

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

**Sobre a Utilização do Sistema de Isolamento Térmico pelo Interior
em Edifícios Residenciais em Portugal**
Análise do Desempenho Higrotérmico

Tiago Miguel Duarte Ferreira

Licenciado em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para a satisfação parcial dos requisitos do grau de
Mestre em Construção de Edifícios

Dissertação realizada sob supervisão da
Professora Doutora Maria Helena Póvoas Corvacho,
do Departamento de Engenharia Civil
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, Abril de 2006

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Prof. Maria Helena Corvacho a orientação científica deste trabalho conjugando de uma forma tão invulgar uma natureza extremamente afável com uma postura científica irrepreensível, e particularmente pela confiança depositada quer no momento inicial de maior dificuldade quer nos períodos de menor motivação ao longo da sua execução.

Ao Prof. Rui Calejo Rodrigues pelos constantes incentivos à realização deste objectivo ultrapassando totalmente as obrigações de uma mera relação laboral, proporcionando as condições profissionais e o estímulo pessoal que permitiram a sua conclusão.

Ao Eng. Ricardo Araújo Sá pela amizade, rigor e competência que me soube transmitir, que espero terem inspirado e que transpareçam no resultado final deste trabalho.

Aos colegas de empresa Armanda Gonçalves, Eduarda Silva, Luís Afonso e Vasco Pinto, por relevarem as ausências e tolerarem os momentos de pior humor sempre com muito companheirismo. Ao Luís Afonso, em particular, agradeço a competência e o empenho colocados na elaboração das figuras que ilustram este trabalho.

Ao Arq. Olivier Pennetier, responsável pelo fórum do programa de simulação utilizado na avaliação das condições de conforto térmico no interior de edifícios, pelo interesse que sempre manifestou nas inúmeras questões colocadas.

Aos meus pais, por terem sempre acreditado no meu trabalho e respeitado as pausas e ausências durante a sua realização, e sobretudo pelo sólido suporte familiar proporcionado ao longo de todo o percurso escolar e pessoal até ao momento.

O agradecimento mais especial fica reservado para a minha companheira de já tantas jornadas, Maria Eduarda Baptista, a quem dedico o trabalho, pelo precioso auxílio em muitas das tarefas necessárias à sua elaboração, sobretudo nas simulações e avaliação de parâmetros dinâmicos que constituem o Capítulo 5 e o Anexo III, e na formatação final do documento, mas especialmente pela paciência, carinho e votos de confiança constantes.

RESUMO

O crescimento das exigências de conforto térmico em edifícios residenciais é um indicador positivo numa sociedade moderna, desde que suportado por uma consciencialização da necessidade da minimização dos recursos energéticos para a sua obtenção.

O presente trabalho insere-se num cenário de evolução de uma tecnologia construtiva dita tradicional de execução da envolvente vertical exterior de edifícios residenciais, com uma solução em pano duplo de alvenaria integrando material isolante térmico na caixa de ar, para uma solução em pano simples ao qual é agregado um sistema de isolamento térmico.

Na indústria da construção nacional esse sistema tem sido quase exclusivamente aplicado pelo exterior, sendo residual a utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior, não obstante as diversas vantagens que o tornam numa solução concorrencial em vários países europeus. O desenvolvimento previsto para o sector da reabilitação em detrimento da construção residencial nova justifica igualmente uma avaliação detalhada desta tecnologia alternativa de isolamento térmico.

Neste trabalho efectua-se uma análise técnica da utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior em edifícios residenciais em Portugal, combinando uma perspectiva tecnológica relativa aos tipos de sistemas disponíveis e modo de aplicação em obra, com uma análise quantitativa do seu desempenho, quer no que respeita às principais exigências higrotérmicas da envolvente vertical exterior, designadamente abordando as temáticas das condensações internas, pontes térmicas e variações de temperatura da parede exterior, quer ao nível dos requisitos de conforto térmico interior.

As conclusões do trabalho permitem quantificar as principais vantagens e desvantagens do sistema no domínio do desempenho higrotérmico, bem como estabelecer um conjunto de recomendações tendentes a optimizar a sua integração em edifícios residenciais.

Palavras-chave

Isolamento térmico interior, conforto higrotérmico, edifícios residenciais, sustentabilidade.

ABSTRACT

The increase of thermal comfort requirements in residential buildings is a positive indicator in a modern society, in the condition of being supported by the public recognition of the necessity to minimize the energy resources for its attainment.

The background to this work is an evolution scenario from a traditional construction technique of the residential buildings façade with a masonry cavity wall partially filled with a thermal insulation material to a single leaf wall with a thermal insulation system.

In the Portuguese construction industry, when the single leaf wall is used the external thermal insulation system predominates. The use of the internal thermal insulation system is almost inexistent, despite the diverse advantages that substantiate its adoption as a competitive system in several European countries. The development foreseen for the retrofitting sector when compared to the new construction market also justifies a detailed evaluation of this thermal insulation alternative technique.

In the present work an analysis of the internal thermal insulation system use in residential buildings in Portugal is performed, combining a technical insight of the different types of available systems and its application on the construction site, with a quantitative analysis, both for the main hygrothermal requirements of the buildings façade, more precisely interstitial condensations, thermal bridges and temperature variations on the wall leaf, and also for the internal thermal comfort requirements.

The work conclusions allow to quantify the main advantages and disadvantages of the system in the hygrothermal performance domain, as well to establish a set of proposals to optimize its integration in residential buildings.

Key-words

Internal thermal insulation, hygrothermal comfort, residential buildings, sustainability.

ÍNDICE GERAL

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS	2
1.3	ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA	4
2.	ESTADO DO CONHECIMENTO RELATIVO	
	AO DESEMPENHO TÉCNICO DO SISTEMA	7
2.1	INTRODUÇÃO	7
2.2	ASPECTOS GERAIS	8
2.3	ENERGIA E COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO	10
2.3.1	MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO	10
2.3.2	CONDENSAÇÕES INTERNAS	13
2.3.3	PONTES TÉRMICAS	17
2.3.3.1	ACRÉSCIMO DE PERDAS TÉRMICAS PARA O EXTERIOR	17
2.3.3.2	CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS	25
2.3.4	ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO EM REGIME VARIÁVEL	27
2.3.4.1	INÉRCIA TÉRMICA E ADMITÂNCIA TÉRMICA	27
2.3.4.2	VARIAÇÕES DE TEMPERATURA	31
2.4	OUTRAS EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO	34
2.4.1	HIGIENE, SAÚDE E MEIO AMBIENTE	34
2.4.2	SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	37
2.4.3	PROTECÇÃO CONTRA O RUÍDO	39
2.4.4	RESISTÊNCIA MECÂNICA E ESTABILIDADE	46
2.4.5	SEGURANÇA NA UTILIZAÇÃO	46
3.	ANÁLISE TECNOLÓGICA DOS SISTEMAS EXISTENTES.....	47
3.1	INTRODUÇÃO	47
3.2	CLASSIFICAÇÃO GENÉRICA	47
3.3	MODO DE CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS	49
3.4	SISTEMA DIRECTO	50
3.4.1	MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO	50
3.4.2	ELEMENTO DE REVESTIMENTO	51
3.4.2.1	ASPECTO	52
3.4.2.2	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	52
3.4.2.3	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	52

3.4.2.4	CARACTERÍSTICAS DE UTILIZAÇÃO	53
3.4.3	TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO	54
3.4.4	PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DE UTILIZAÇÃO	59
3.5	SISTEMA SEMI-DIRECTO	60
3.5.1	TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO	60
3.5.2	ESTRUTURA DE SUPORTE	61
3.5.3	MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO E ELEMENTO DE REVESTIMENTO	62
3.5.4	PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DE UTILIZAÇÃO	64
3.6	SISTEMA AUTOPORTANTE	65
3.6.1	TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO	65
3.6.2	ESTRUTURA DE SUPORTE	65
3.6.2.1	FIXAÇÃO DAS GUIAS	66
3.6.2.2	COLOCAÇÃO DOS MONTANTES	68
3.6.3	MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO	70
3.6.4	ELEMENTO DE REVESTIMENTO	71
3.6.5	PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DE UTILIZAÇÃO	72
3.7	PRINCIPAIS CONDIÇÕES PARA A APLICAÇÃO DOS SISTEMAS EM OBRA	73
3.8	QUADRO-SÍNTESE	74
4.	ANÁLISE DO DESEMPENHO FACE ÀS EXIGÊNCIAS HIGROTÉRMICAS	
	DA ENVOLVENTE VERTICAL EXTERIOR	77
4.1	INTRODUÇÃO	77
4.2	CONDENSAÇÕES INTERNAS	81
4.2.1	ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS	81
4.2.2	METODOLOGIA DE CÁLCULO	83
4.2.2.1	MODELO DE GLASER	83
4.2.2.2	OUTRAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO	84
4.2.3	CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS DE REFERÊNCIA	85
4.2.3.1	AMBIENTE INTERIOR	85
4.2.3.2	AMBIENTE EXTERIOR	87
4.2.4	ELEMENTO CONSTRUTIVO DE REFERÊNCIA	88
4.2.5	CÁLCULOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
4.3	PONTES TÉRMICAS	96
4.3.1	ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS	96
4.3.2	DESCRIPTORIOS DE DESEMPENHO	98
4.3.3	METODOLOGIA DE CÁLCULO	99
4.3.4	CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS DE REFERÊNCIA	101
4.3.4.1	AMBIENTE EXTERIOR	101
4.3.4.2	AMBIENTE INTERIOR	101
4.3.5	ELEMENTO CONSTRUTIVO DE REFERÊNCIA	102
4.3.6	SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO	106

4.3.7	RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
4.3.7.1	EXEMPLO DE ANÁLISE – CONFIGURAÇÕES C1.1.x e C1.2.x.....	108
4.3.7.2	SÍNTESE DE RESULTADOS E PRINCÍPIOS DE CORRECÇÃO	109
4.4	VARIAÇÕES DE TEMPERATURA	116
4.4.1	ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS.....	116
4.4.2	METODOLOGIA	117
4.4.3	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES DE REFERÊNCIA	119
4.4.4	ELEMENTO CONSTRUTIVO DE REFERÊNCIA	123
4.4.5	SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO.....	123
4.4.5.1	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE VERÃO.....	124
4.4.5.2	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE INVERNO	129
4.4.6	ANÁLISE DE RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DO SISTEMA.....	132
4.4.6.1	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE VERÃO.....	132
4.4.6.2	CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE INVERNO	133
4.4.6.3	RECOMENDAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DO SISTEMA	135
5.	ANÁLISE DO DESEMPENHO FACE ÀS EXIGÊNCIAS DE	
	CONFORTO TÉRMICO EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS.....	139
5.1	INTRODUÇÃO	139
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO.....	142
5.2.1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICAÇÃO	142
5.2.2	PRINCÍPIOS GERAIS DE CÁLCULO	143
5.2.2.1	COMPORTAMENTO MÉDIO DIÁRIO	144
5.2.2.2	COMPORTAMENTO DINÂMICO HORÁRIO	146
5.2.3	PRINCIPAIS LIMITAÇÕES.....	149
5.3	DADOS CLIMÁTICOS.....	151
5.4	PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS UTILIZADAS.....	154
5.4.1	ENVOLVENTE OPACA	154
5.4.2	VÃOS ENVIDRAÇADOS	157
5.5	SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO.....	158
5.5.1	CONDIÇÕES GERAIS DE SIMULAÇÃO	158
5.5.2	CARACTERIZAÇÃO GERAL DO TIPO DE SITUAÇÃO ANALISADA.....	160
5.5.3	EXEMPLO DE CÁLCULO.....	161
5.5.4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	166
5.5.4.1	1 FACHADA, SEM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 00:00–24:00.....	167
5.5.4.2	1 FACHADA, SEM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 18:00-24:00	170
5.5.4.3	1 FACHADA, COM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 00:00-24:00	172
5.5.4.4	1 FACHADA, COM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 18:00-24:00	175
5.5.4.5	2 FACHADAS, SEM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 00:00-24:00.....	176
5.5.4.6	2 FACHADAS, SEM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 18:00-24:00.....	178
5.5.4.7	2 FACHADAS COM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 00:00-24:00	179

5.5.4.8	2 FACHADAS COM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 18:00-24:00	181
5.5.4.9	SÍNTESE DE CONCLUSÕES	182
6.	CONCLUSÕES	185
6.1	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	185
6.2	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	191
	BIBLIOGRAFIA	193
	ANEXO I	201
	ANEXO II	207
	ANEXO III	235

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Etiqueta da certificação CSTBat [19]	12
Figura 2.2 – Esquema ilustrativo dos constituintes do sistema de isolamento térmico pelo interior utilizados para a definição das regras de concepção relativas a condensações internas	14
Figura 2.3 – Esquema ilustrativo da situação analisada no estudo do CSTB relativo à avaliação da ocorrência de pontes térmicas [26]	18
Figura 2.4 – Exemplo de avaliação do parâmetro ψ numa ligação entre uma cobertura plana e uma fachada com isolamento térmico pelo interior [29]	21
Figura 2.5 – Exemplo 1 da utilização de dimensões interiores ou exteriores [30].....	22
Figura 2.6 – Exemplo 2 da utilização de dimensões interiores ou exteriores [30].....	23
Figura 2.7 – Transposição do valor de ψ entre sistemas de dimensões distintos [29]	23
Figura 2.8 – Exemplo de resultados de um catálogo de pontes térmicas para uma ligação entre uma parede exterior com isolamento térmico pelo interior e uma laje intermédia [29]	24
Figura 2.9 – Exemplo de um ensaio laboratorial de redução sonora referente a uma solução comercial de isolamento térmico pelo interior [49]	41
Figura 2.10 – Caminhos de transmissão sonora, para um dos 4 nós que definem a compartimentação entre dois espaços interiores	43
Figura 2.11 – Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e o ganho de isolamento sonoro de um sistema directo com poliestireno expandido como material isolante térmico [53] ...	44
Figura 3.1 – Classificação da superfície do elemento construtivo de suporte [47].....	55
Figura 3.2 – Aplicação do produto de colagem sob a forma de montículos [47]	56
Figura 3.3 – Aplicação do produto de colagem sob a forma de bandas [47]	57
Figura 3.4 – Pormenor de ligação de um sistema do tipo directo com um pavimento em zona corrente (não húmida)	58
Figura 3.5 – Perspectiva de um perfil metálico de suporte em sistemas do tipo semi-directo [57] .	61
Figura 3.6 – Modulação de sistemas do tipo semi-directo e introdução de perfis de reforço [47] ..	62
Figura 3.7 – Aparafusamento do sistema aos elementos de suporte [47]	63
Figura 3.8 – Estrutura de suporte em sistemas do tipo autoportante.....	66
Figura 3.9 – Pormenor do material resiliente sob a guia de pavimento	67

Figura 3.10 – Vista da fixação descentrada das guias	67
Figura 3.11 – Pormenorização da interrupção de montantes perimetrais [47]	69
Figura 3.12 – Montantes de modulação do sistema.....	69
Figura 3.13 – Utilização de fibras de celulose como material isolante térmico	70
Figura 3.14 – Fixação das placas de gesso cartonado aos montantes.....	71
Figura 3.15 – Folga no bordo inferior das placas de gesso cartonado.....	71
Figura 4.1 – Variação da higrometria com o tipo de ocupação do local, a taxa de ventilação e temperatura exterior, incluindo duas classes referentes a edifícios residenciais (3 e 4) [34]	86
Figura 4.2 – Esquema ilustrativo do elemento construtivo considerado para a avaliação da probabilidade de ocorrência de condensações internas	88
Figura 4.3 – Análise por termografia da temperatura superficial de uma fachada identificando-se diversas zonas de ponte térmica [29].....	96
Figura 4.4 – Condensações superficiais por efeito de uma ponte térmica (e de infiltrações).....	97
Figura 4.5 – Distâncias a respeitar face aos planos de corte dos elementos marginais [30]	100
Figura 4.6 – Aspecto dos resultados globais apresentados pelo programa “Kobra”	100
Figura 4.7 – Esquema ilustrativo do elemento construtivo considerado para a avaliação da gravidade associada à ocorrência de pontes térmicas.....	103
Figura 4.8 – Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais.....	107
Figura 4.9 – Pormenor de ligação entre o sistema de isolamento térmico pelo interior e a caixilharia (corte vertical)	114
Figura 4.10 – Pormenor de ligação entre o sistema de isolamento térmico pelo interior e a caixilharia (corte horizontal)	115
Figura 4.11 – Pormenor de ligação entre o sistema de isolamento térmico pelo interior e a caixa de estore (corte vertical).....	115
Figura 4.12 – Definição da malha representativa do elemento construtivo em estudo	117
Figura 4.13 – Dados de radiação solar global [W/m^2] incidente num plano vertical para orientações distintas, num dia de Julho, na cidade do Porto.....	120
Figura 4.14 – Dados de radiação solar global [W/m^2] incidente num plano vertical para orientações distintas, num dia de Dezembro, na cidade do Porto.....	120
Figura 4.15 – Valores de temperatura exterior [$^{\circ}\text{C}$], ambiente e fictícia ar-sol, num elemento vertical com diferentes orientações, para um dia de Julho, na cidade do Porto, considerando um valor de $\alpha = 0,70$	121

Figura 4.16 – Valores de temperatura exterior [°C], ambiente e fictícia ar-sol, num elemento vertical com diferentes orientações, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, considerando um valor de $\alpha = 0,70$	121
Figura 4.17 – Valores de temperatura exterior [°C], ambiente e fictícia ar-sol, num elemento vertical com diferentes orientações, para um dia de Julho, na cidade do Porto, considerando um valor de $\alpha = 0,30$	122
Figura 4.18 – Valores de temperatura exterior [°C], ambiente e fictícia ar-sol, num elemento vertical com diferentes orientações, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, considerando um valor de $\alpha = 0,30$	122
Figura 4.19 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Norte, considerando uma espessura de isolante térmico de 3 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	124
Figura 4.20 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Norte, considerando uma espessura de isolante térmico de 3 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	124
Figura 4.21 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Norte, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	125
Figura 4.22 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Norte, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	125
Figura 4.23 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 3 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	126
Figura 4.24 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 3 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	126
Figura 4.25 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	127
Figura 4.26 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	127

Figura 4.27 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,30$	128
Figura 4.28 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,30$	128
Figura 4.29 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Sul, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	129
Figura 4.30 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Sul, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	129
Figura 4.31 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Sul, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,30$	130
Figura 4.32 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Sul, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,30$	130
Figura 4.33 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	131
Figura 4.34 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$	131
Figura 5.1 – Ilustração do modelo de simulação utilizado para aplicação do “BESTEST” [79] ...	150
Figura 5.2 – Evolução diária dos valores máximos e mínimos diários da temperatura exterior para a cidade de Faro (aplicação “Weather Tool”)	152
Figura 5.3 – Evolução diária dos valores máximos e mínimos diários da temperatura exterior para a cidade do Porto (aplicação “Weather Tool”).....	153
Figura 5.4 – Evolução diária dos valores máximos e mínimos diários da temperatura exterior para a cidade de Bragança (aplicação “Weather Tool”).....	153
Figura 5.5 – Exemplo de resultados para a situação 1F E 15 24h SV	165
Figura 5.6 – Desconforto térmico global para a situação 1F N 15 24h SV	167
Figura 5.7 – Desconforto térmico global para a situação 1F S 15 24h SV.....	168

Figura 5.8 – Desconforto térmico global para a situação 1F S 25 24h SV	169
Figura 5.9 – Desconforto térmico global para a situação 1F N 15 6h SV.....	170
Figura 5.10 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 15 6h SV.....	171
Figura 5.11 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 25 6h SV.....	171
Figura 5.12 – Desconforto térmico global para a situação 1F N 15 24h CV	172
Figura 5.13 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 15 24h CV	173
Figura 5.14 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 25 24h CV	174
Figura 5.15 – Desconforto térmico global para a situação 1F S 25 24h CV.....	174
Figura 5.16 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 15 6h CV	175
Figura 5.17 – Desconforto térmico global para a situação 2F SO 38 24h SV	176
Figura 5.18 – Desconforto térmico global para a situação 2F SO 58 24h SV	177
Figura 5.19 – Desconforto térmico global para a situação 2F NE 38 6h SV	178
Figura 5.20 – Desconforto térmico global para a situação 2F NO 38 24h SV.....	179
Figura 5.21 – Desconforto térmico global para a situação 2F NO 38 24h CV	180
Figura 5.22 – Desconforto térmico global para a situação 2F NO 58 24h CV	180
Figura 5.23 – Desconforto térmico global para a situação 2F NO 38 6h CV	181

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Requisitos essenciais definidos pela Directiva Produtos de Construção [10].....	7
Quadro 2.2 – Principais vantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo interior [11-15].....	8
Quadro 2.3 – Principais desvantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo interior [11-15]	8
Quadro 2.4 – Principais vantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo exterior [11-15].....	9
Quadro 2.5 – Principais desvantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo exterior [11-15]....	9
Quadro 2.6 – Exigências de desempenho de materiais isolantes térmicos referentes à certificação ACERMI [18]	11
Quadro 2.7 – Níveis mínimos de aptidão de materiais isolantes térmicos em sistemas de isolamento térmico pelo interior (paredes exteriores) [18]	12
Quadro 2.8 – Níveis mínimos de aptidão de materiais isolantes térmicos em sistemas de isolamento térmico pelo exterior (paredes exteriores) [18]	12
Quadro 2.9 – Regras de concepção para paredes exteriores com um sistema de isolamento térmico pelo interior de modo a limitar a ocorrência de condensações internas [20]	15
Quadro 2.10 – Regras de concepção para paredes exteriores com fraca resistência térmica de modo a limitar a ocorrência de condensações internas [20].....	16
Quadro 2.11 – Classes de permeância em complexos de gesso cartonado e isolante térmico [25] .	16
Quadro 2.12 – Valores de resistência térmica do material isolante térmico considerados na avaliação da influência das pontes térmicas [26].....	18
Quadro 2.13 – Resultados da avaliação da influência das pontes térmicas em sistemas de isolamento interior e exterior [26].....	20
Quadro 2.14 – Classificação do efeito da ponte térmica nas condições de sustentabilidade [30] ...	21
Quadro 2.15 – Valores característicos da capacidade, difusividade e efusividade térmicas de alguns materiais construtivos [37].....	29
Quadro 2.16 – Dados climáticos (temperatura exterior e radiação solar) considerados na simulação para um dia típico de Inverno [26].....	31
Quadro 2.17 – Dados climáticos (temperatura exterior e radiação solar) considerados na simulação para um dia típico de Verão [26].....	32

Quadro 2.18 – Temperaturas mínimas e máximas atingidas numa parede exterior com sistemas de isolamento térmico pelo interior e pelo exterior [26]	32
Quadro 2.19 – Espessuras mínimas do pano exterior de parede em função da posição do material isolante térmico [41]	33
Quadro 2.20 – Balanço energético de diversos materiais isolantes térmicos [42]	35
Quadro 2.21 – Principais aspectos analisados na avaliação ambiental, de higiene e saúde de um sistema de isolamento térmico pelo interior [44]	36
Quadro 2.22 – Determinação de ΔR_w em função da frequência de ressonância f_0 e do índice R_w do elemento construtivo de base [48]	41
Quadro 2.23 – Índice ΔR_w de um sistema de isolamento térmico pelo interior aplicado a uma parede de alvenaria de tijolo furado com 15 cm de espessura rebocada em ambas as faces com 2 cm [48]	42
Quadro 2.24 – Índice ΔR_w para sistemas de isolamento térmico pelo exterior [54]	45
Quadro 3.1 – Classificação dos sistemas de isolamento térmico pelo interior [47][57]	48
Quadro 3.2 – Exemplos de materiais isolantes térmicos em sistemas do tipo directo [55]	50
Quadro 3.3 – Sistemas do tipo directo constantes do catálogo de uma marca comercial [60]	51
Quadro 3.4 – Principais características físicas das placas de gesso cartonado	53
Quadro 3.5 – Denominação comercial dos principais tipos de placas de gesso cartonado [47]	54
Quadro 3.6 – Quadro-síntese para selecção de um sistema de isolamento térmico pelo interior	75
Quadro 4.1 – Órgãos principais e secundários a considerar na subdivisão de um edifício [66][67]	77
Quadro 4.2 – Principais exigências funcionais relativas à envolvente exterior acima do solo [67] [8]	78
Quadro 4.3 – Síntese das principais implicações do sistema de isolamento térmico pelo interior ao nível das exigências funcionais da envolvente exterior acima do solo	79
Quadro 4.4 – Mecanismos de transporte e fixação da humidade num elemento construtivo [68] ...	81
Quadro 4.5 – Situações de referência relativamente à produção de vapor de água no interior de edifícios residenciais em Portugal [30]	87
Quadro 4.6 – Valores médios mensais de temperatura (≤ 13 °C) e humidade relativa exterior (%) representativos das zonas climáticas de Inverno em Portugal [30]	87
Quadro 4.7 – Espessura de material isolante térmico para diferentes níveis de qualidade térmica .	89
Quadro 4.8 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] passíveis de originar condensações internas na zona climática I1 (material isolante térmico – lã de rocha 50 kg/m^3)	90

Quadro 4.9 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] passíveis de originar condensações internas na zona climática I2 (material isolante térmico – lã de rocha 50 kg/m^3)	91
Quadro 4.10 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] passíveis de originar condensações internas na zona climática I3 (material isolante térmico – lã de rocha 50 kg/m^3)	92
Quadro 4.11 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] para diversos materiais isolantes térmicos passíveis de originar condensações internas na zona climática I1	93
Quadro 4.12 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] para diversos materiais isolantes térmicos passíveis de originar condensações internas na zona climática I2	93
Quadro 4.13 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] para diversos materiais isolantes térmicos passíveis de originar condensações internas na zona climática I3	93
Quadro 4.14 – Valores de referência para a condutância térmica superficial interior (h_i) [28]	102
Quadro 4.15 – Quadro-síntese das configurações de ponte térmica analisadas	105
Quadro 4.16 – Cenários de humidade relativa no interior de edifícios residenciais	107
Quadro 4.17 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C1	110
Quadro 4.18 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C2	110
Quadro 4.19 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C3	111
Quadro 4.20 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C4	111
Quadro 4.21 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C5	112
Quadro 4.22 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C6	112
Quadro 4.23 – Coeficiente de absorção solar em função da cor do revestimento exterior [8]	119
Quadro 4.24 – Síntese de valores do alongamento unitário de uma parede de alvenaria de tijolo sujeita aos valores de amplitude térmica simulados	135
Quadro 5.1 – Principais factores que influenciam o estado de equilíbrio térmico de um indivíduo	140
Quadro 5.2 – Valores recomendados para alguns parâmetros de avaliação de conforto térmico relacionados com o ambiente higrotérmico interior [71]	141
Quadro 5.3 – Propriedades necessárias para a caracterização de uma solução construtiva opaca no programa de simulação utilizado	154

Quadro 5.4 – Caracterização das propriedades térmicas da parede exterior com isolamento térmico pelo interior	155
Quadro 5.5 – Caracterização das propriedades térmicas da parede exterior com isolamento térmico pelo exterior.....	155
Quadro 5.6 – Caracterização das propriedades térmicas da parede divisória interior	156
Quadro 5.7 – Caracterização das propriedades térmicas da laje de pavimento	156
Quadro 5.8 – Caracterização das propriedades térmicas da laje de tecto	157
Quadro 5.9 – Propriedades necessárias para a caracterização de um vão envidraçado no programa de simulação utilizado	157
Quadro 5.10 – Caracterização da solução do vão envidraçado utilizado nas simulações	158
Quadro 5.11 – Condições gerais de simulação – ambiente higrotérmico interior	159
Quadro 5.12 – Condições gerais de simulação – indivíduo.....	159
Quadro 5.13 – Síntese de situações analisadas.....	161
Quadro 5.14 – Representação esquemática (planta) das situações simuladas para a situação de uma fachada exposta (sem e com vãos envidraçados)	162
Quadro 5.15 – Representação esquemática (planta) das situações simuladas para a situação de duas fachadas expostas (sem e com vãos envidraçados)	163

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Em Portugal, o sector da construção civil, e particularmente o segmento residencial, tem assistido a um notório acréscimo das exigências de conforto, consequência sobretudo da maior capacidade económica e de informação dos cidadãos e da transposição de diversas normativas europeias que, conjuntamente com as restrições económicas das empresas associadas a uma crescente competitividade do sector, tem vindo a desencadear, ainda que de forma lenta, a industrialização do processo produtivo.

Paralelamente, estudos recentes [1] [2] prevêem um abrandamento no crescimento do segmento residencial novo, contrastando com o crescimento do sector de reabilitação, cuja complexidade técnica é normalmente superior, implicando por parte da indústria nacional uma modernização das tecnologias e metodologias construtivas.

Das diversas exigências de qualidade reclamadas pelos utilizadores do produto edifício residencial, o conforto térmico tem vindo a assumir um destaque crescente, embora o seu peso no consumo total de energia final do país seja ainda de cerca de 13% [3].

No entanto, a elevada taxa de crescimento durante a década de 1990 (valor médio anual de 3,7% [3]), permite antever a médio prazo uma convergência (pesando naturalmente as diferentes condições climáticas) da importância deste segmento para valores similares aos da média europeia onde, em 2002, 77% dos cerca de 40% da totalidade da energia final dispendida por edifícios correspondia ao segmento residencial [4].

Ponderando simultaneamente a deficiente conjuntura energética nacional, que apresenta o maior valor de intensidade energética do PIB de todo o espaço europeu [5], considera-se ser um dever deontológico dos especialistas na concepção e execução de edifícios residenciais uma actuação no sentido de inverter esta tendência.

A conjugação destes factores impele à avaliação da viabilidade técnica da introdução de tecnologias de construção alternativas, particularmente no domínio do isolamento térmico, que permitam otimizar a concepção dos edifícios residenciais na sua relação com o clima e desejavelmente, numa perspectiva pedagógica, instiguem a um usufruto mais racional dos equipamentos de climatização para a satisfação das exigências de conforto térmico.

1.2 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

A partir de meados da década de 1990, os sistemas de isolamento térmico pelo exterior começaram a ser frequentemente utilizados no segmento residencial em detrimento da solução que, desde a década de 1980, mas sobretudo a partir de 1991 com a publicação do primeiro regulamento neste domínio [6], se assumiu como tradicional para o isolamento térmico da envolvente exterior vertical: parede dupla em alvenaria de tijolo furado, com caixa de ar parcialmente preenchida por material isolante térmico (de acordo com a definição proposta em [7] ¹) de espessura reduzida (3-5 cm).

A preferência pela execução da envolvente vertical exterior em pano simples em detrimento do pano duplo resulta de diversos factores, dos quais se destacam o seu elevado custo de execução, a deficiente preparação da mão-de-obra, a escassa pormenorização em fase de projecto com as patologias daí inerentes, e a menor relação custo/benefício em situações correntes, tendo esta opção sido recentemente corroborada por Alves [8] através de uma avaliação tecnológica detalhada da sua utilização.

As conclusões são todavia díspares quando se considera a utilização de paredes em pano simples conjugadas com sistemas de isolamento térmico pelo interior, não sendo vulgar a sua adopção, ou sequer recomendação [8] [9] em Portugal, exceptuando em trabalhos de reabilitação, seja em fracções individuais de edifícios colectivos ou sempre que a manutenção do aspecto da fachada seja um factor condicionante.

¹ Materiais dotados de uma resistência térmica (R) superior a 0,5 m²·°C/W e um coeficiente de condutibilidade térmica (λ) inferior ou igual a 0,065 W/(m·°C).

Contrastando com este cenário encontram-se diversos países europeus (Espanha, França, Reino Unido) nos quais este tipo de sistema constitui uma solução concorrencial, quer em situações de reabilitação quer inclusive em construção nova de edifícios residenciais.

Pretende-se com este trabalho aprofundar o conhecimento das vantagens e desvantagens associadas à integração dos sistemas de isolamento térmico pelo interior em edifícios residenciais no contexto nacional, visando a definição de um conjunto de recomendações técnicas que permitam otimizar as suas potencialidades e minimizar os inconvenientes conhecidos e (ou) entretanto detectados, particularmente ao nível da sua influência no desempenho higrotérmico da envolvente vertical exterior e no conforto térmico interior.

O enfoque na análise do desempenho higrotérmico não significa que a interacção do sistema com as restantes exigências funcionais da envolvente vertical exterior seja negligenciada, mas somente que não é efectuada uma análise aprofundada com novos desenvolvimentos, limitando-se a uma resenha do estado de conhecimento nesse domínio.

Por outro lado, algumas dessas exigências possuem um cariz genérico de aplicação a paredes exteriores em pano simples, independentemente da posição do material isolante térmico, tendo sido já analisadas em recente trabalho neste domínio [8].

De forma a enquadrar o objecto de estudo sob o ponto de vista tecnológico, desenvolve-se complementarmente uma análise dos tipos de sistemas de isolamento térmico pelo interior existentes no mercado e das principais particularidades associadas à sua execução em obra.

No que respeita à análise de desempenho higrotérmico privilegia-se uma abordagem quantitativa, apesar desta corresponder forçosamente a situações tipo, quer sob os pontos de vista construtivo e arquitectónico, quer da própria utilização dos edifícios, pelo que em alguns casos se deve valorizar a ordem de grandeza dos resultados obtidos face à sua exactidão quando transpostos para uma situação concreta. Importa assim advertir que uma eventual extrapolação dos resultados apresentados deverá ser efectuada de forma judiciosa, atendendo sempre aos pressupostos considerados neste trabalho.

Em síntese, com o trabalho desenvolvido pretende-se contribuir para uma clarificação e desenvolvimento dos conhecimentos actuais nos seguintes cinco domínios:

- Soluções de isolamento térmico pelo interior disponíveis no mercado da construção e principais particularidades tecnológicas associadas à sua integração em edifícios residenciais;
- Probabilidade de ocorrência de condensações internas e recomendações técnicas para a sua minimização;
- Gravidade associada à ocorrência de pontes térmicas e recomendações técnicas para a redução do fenómeno e das suas consequências;
- Variações de temperatura no seio da parede exterior, medidas para a redução do fenómeno e recomendações técnicas para a limitação das suas consequências;
- Influência da utilização do sistema na obtenção de condições de conforto térmico no interior de edifícios residenciais.

1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA

No Capítulo 1 esclarece-se a motivação subjacente à elaboração do trabalho, procede-se ao enquadramento da temática em apreço no panorama construtivo nacional, e enumeram-se os principais aspectos a que se pretende dar resposta.

No Capítulo 2 efectua-se uma súmula do estado actual do conhecimento neste domínio, incidindo na avaliação da satisfação dos requisitos de desempenho exigíveis a este tipo de componente construtivo.

No Capítulo 3 são apresentados e caracterizados os vários tipos de sistemas de isolamento térmico pelo interior correntes no mercado, descrevendo-se sucintamente a tecnologia de aplicação em obra e os diversos condicionalismos existentes.

No Capítulo 4 procede-se a uma análise do desempenho do sistema face às exigências higrotérmicas da envolvente vertical exterior de edifícios residenciais – condensações internas, pontes térmicas e variações de temperatura no seio da parede exterior.

No Capítulo 5 avalia-se influência da integração de um sistema de isolamento térmico pelo interior num compartimento de um edifício residencial ao nível das exigências de conforto térmico, fazendo variar diversos parâmetros tais como o factor de forma, orientação, existência de vãos envidraçados, período de ocupação e clima exterior, sendo os resultados obtidos comparados com situações análogas mas um sistema aplicado pelo exterior.

Finalmente no Capítulo 6 coligem-se as principais conclusões do trabalho e apontam-se alguns aspectos a merecer desenvolvimentos futuros.

São ainda apresentados três anexos:

- No Anexo I compilam-se as propriedades térmicas, hígricas e físicas dos diversos materiais utilizados nas simulações desenvolvidas;
- No Anexo II apresentam-se os resultados da análise do desempenho do sistema face à gravidade associada à ocorrência de pontes térmicas (Capítulo 4);
- No Anexo III é exposto em exemplo de cálculo dos parâmetros de comportamento térmico em regime dinâmico necessários para a integração no programa de simulação utilizado no âmbito do Capítulo 5.

CAPÍTULO 2

ESTADO DO CONHECIMENTO RELATIVO AO DESEMPENHO TÉCNICO DO SISTEMA

2.1 INTRODUÇÃO

Sendo os sistemas de isolamento térmico pelo interior soluções construtivas pré-fabricadas ou resultantes da agregação de vários componentes pré-fabricados, a resenha do estado do conhecimento no âmbito do seu desempenho técnico foi estruturada a partir dos “requisitos essenciais” definidos na “Directiva Produtos de Construção” (DPC) [10] (Quadro 2.1), não obstante esta ser apenas aplicável individualmente aos diversos componentes do sistema e não a uma possível solução pré-fabricada conjunta.

Quadro 2.1 – Requisitos essenciais definidos pela Directiva Produtos de Construção [10]

Designação
Resistência mecânica e estabilidade
Segurança contra incêndios
Higiene, saúde e meio ambiente
Segurança na utilização
Protecção contra o ruído
Economia de energia e isolamento térmico

Atendendo aos objectivos deste trabalho, privilegia-se o enfoque no requisito “economia de energia e isolamento térmico”, adoptando-se as designações “energia e comportamento higrotérmico” e “exigência” em detrimento de “economia de energia e isolamento térmico” e “requisito”. Quanto às demais exigências de desempenho identificadas (Quadro 2.1), a profundidade da análise desenvolvida relaciona-se com a importância relativa de cada uma no contexto da utilização do sistema em edifícios residenciais.

2.2 ASPECTOS GERAIS

A maioria das referências bibliográficas da especialidade desenvolve a sua análise técnica relativa aos sistemas de isolamento térmico pelo interior recorrendo à enumeração das suas principais vantagens e inconvenientes em comparação com os seus congéneres aplicados pelo exterior, que se sistematizam seguidamente (Quadros 2.2 a 2.5) [11-15]. Atendendo aos objectivos deste capítulo a abordagem efectuada é ainda essencialmente qualitativa.

Quadro 2.2 – Principais vantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo interior [11-15]

Factor	Desempenho
Aplicação e Durabilidade	Aplicação e desempenho futuro não afectados pelas condições climáticas exteriores.
Reabilitação Térmica	Possibilidade da manutenção da identidade arquitectónica da fachada, bem como de uma intervenção individualizada num ou mais fogos de um edifício residencial colectivo.
Custo	Solução construtiva pouco dispendiosa nas vertentes matéria-prima e execução (não necessita de recorrer a andaimes para a sua aplicação) – em média cerca de metade do custo da solução de isolamento térmico pelo exterior.
Aquecimento	Eventual menor dispêndio de energia no aquecimento interior em regimes do tipo descontínuo (típicos no segmento residencial em Portugal).
Instalações	Permite em alguns tipos de soluções a integração de tubagens sem deterioração do pano de parede (o que acontece na generalidade das soluções tradicionais em alvenaria dupla ou em alvenaria simples com isolamento térmico pelo exterior).
Isolamento Sonoro	O isolamento sonoro entre compartimentos poderá ser melhorado (dependendo do tipo de sistema) pela diminuição da transmissão sonora por via marginal, para além do incremento do isolamento a ruídos aéreos provenientes do exterior garantido pela fachada (sobretudo no caso de não existirem vãos envidraçados).
Comportamento ao Fogo	Quando combinados com determinados elementos de revestimento (ex. gesso cartonado) permitem aumentar significativamente a resistência ao fogo, podendo ser por exemplo utilizados para a protecção ao fogo de estruturas metálicas.

Quadro 2.3 – Principais desvantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo interior [11-15]

Factor	Desempenho
Pontes Térmicas	Potenciador de situações de ponte térmica em diversas configurações construtivas, requerendo disposições específicas de correcção.
Variações de Temperatura	Parede exterior mais susceptível a solicitações de natureza térmica decorrentes sobretudo da variação da radiação solar (incluindo o fenómeno de choque térmico).
Estanquidade	Parede exterior mais susceptível à acção da água de precipitação.

Factor	Desempenho
Inércia Térmica	A inércia térmica (interior) é reduzida em consequência da inutilização da parede exterior como massa de armazenamento térmico.
Reabilitação Térmica	Implica o abandono dos habitantes do interior do edifício. Poderá não permitir a manutenção de ornamentos interiores em edifícios antigos.
Área Útil	Em operações de reabilitação verifica-se uma perda de área útil interior que, embora possa ser considerada reduzida, acarreta sempre uma diminuição do valor do imóvel.
Condensações Internas	Maior risco de ocorrência de condensações na interface entre o material isolante térmico e o pano exterior de parede face às demais soluções de isolamento, implicando a eventual utilização de uma barreira pára-vapor na face quente (interior) do material isolante.

Quadro 2.4 – Principais vantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo exterior [11-15]

Factor	Desempenho
Pontes Térmicas	A probabilidade de ocorrência de pontes térmicas fica praticamente limitada à ligação fachada/vãos envidraçados e à existência de varandas.
Solicitações Parede Suporte	Maior protecção da envolvente exterior face às solicitações climáticas exteriores.
Inércia Térmica	Incremento da inércia térmica (interior) com eventuais benefícios em termos de conforto interior e eficiência energética, sobretudo para regimes de aquecimento contínuo e com ganhos solares significativos.
Reabilitação Térmica	Sem necessidade de abandono dos habitantes do interior do edifício.
Reabilitação Estética	Conjugação da reabilitação do desempenho térmico da fachada com a sua melhoria estética, permitindo a correcção de possíveis patologias existentes.
Área Útil	Em situações de reabilitação é garantida a manutenção de área útil interior.
Estanquidade	Contribui para a estanquidade global da parede exterior à acção da água de precipitação.

Quadro 2.5 – Principais desvantagens dos sistemas de isolamento térmico pelo exterior [11-15]

Factor	Desempenho
Custo	Custo unitário em média superior ao sistema de isolamento térmico pelo interior, podendo aumentar substancialmente com a pormenorização adequada do sistema.
Aplicação	Técnica de execução delicada, efectuada normalmente por equipas especializadas e com condições climáticas apropriadas.
Sistemas de Fixação	A durabilidade e desempenho dos sistemas de fixação (excluindo os ETICS) necessitam de ser cuidadosamente avaliadas atendendo à gravidade da eventual queda de um elemento de revestimento exterior.

Resistência ao Choque	A generalidade dos sistemas possui uma resistência ao choque reduzida (particularmente os ETICS) requerendo disposições construtivas específicas para a sua utilização ao nível dos pisos inferiores, susceptíveis de actos de vandalismo.
Inércia Térmica	Uma inércia térmica (interior) elevada pode revelar-se como um factor prejudicial para edifícios com sistemas de aquecimento intermitente.
Condensações Internas	Risco de ocorrência de condensações internas na interface do material isolante térmico com a camada exterior, que poderão estar relacionadas com o desenvolvimento de fungos e algas que originam manchas nos primeiros anos após a aplicação do sistema [16].

Ao longo deste capítulo apresentam-se os principais estudos respeitantes à generalidade das vantagens e desvantagens realçadas para o sistema de isolamento térmico interior, de forma a distinguir aquelas que se encontram já atestadas pela comunidade científica, das que resultam meramente do desconhecimento técnico do sistema ou das limitações associadas à sua utilização. Naturalmente que para alguns dos aspectos mencionados, tais como a redução da área útil interior, as potencialidades associadas à reabilitação térmica de edifícios e o reduzido custo de aplicação do sistema, a sua veracidade não necessita de ser atestada tecnicamente.

2.3 ENERGIA E COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO

2.3.1 MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO

Em consequência da referida DPC [10] foram criadas diversas normas europeias (ratificadas em 2001) relativas às diferentes famílias de materiais isolantes térmicos, que precisam as características e classes de desempenho a definir pelos seus fabricantes, sendo o seu conhecimento obrigatório no espaço europeu para integração do material numa obra.

Assim, para um determinado material isolante térmico (e para cada espessura), terão que ser declaradas a resistência térmica (R), o coeficiente de condutibilidade térmica (λ) e a reacção ao fogo. Com cariz opcional poderão ser discriminadas outras características técnicas como a tolerância dimensional, a compressibilidade sobre carga, a estabilidade dimensional, a absorção de água e a permeabilidade ao vapor de água, ou ainda outras com interesse para uma utilização específica (ex. coeficiente de absorção sonora).

A comprovação da conformidade pode ser emitida pelo fabricante (exceptuado em situações em que o risco o justifique, tal como a reacção ao fogo para isolantes térmicos a aplicar em sistemas de isolamento térmico pelo exterior), o que implica que a marcação CE poderá não garantir as propriedades de um produto. Um exemplo esclarecedor do referido encontra-se na versão de 2000 de regulamentação térmica francesa [17], que propunha que os parâmetros R e λ de um material isolante térmico fossem multiplicados respectivamente por 0,85 e 1,15 no caso do material ser somente detentor da marcação CE e não possua uma certificação conferida por um organismo acreditado para o efeito.

Em Portugal foi proposta em 1997 por Pinto [18] uma adaptação da certificação ACERMI (“Association pour la Certification des Matériaux Isolants”), referente à certificação e selecção exigencial de isolantes térmicos. Note-se que para os sistemas constituídos por placas de gesso cartonado e material isolante térmico aderido (sistemas do tipo directo de acordo com a classificação apresentada em §3.2), somente o isolante térmico poderá ser alvo da certificação ACERMI. As exigências de desempenho constantes desta certificação são apresentadas no Quadro 2.6.

Quadro 2.6 – Exigências de desempenho de materiais isolantes térmicos referentes à certificação ACERMI [18]

Exigência de Desempenho	Símbolo
Resistência térmica	R
Compressibilidade	I
Estabilidade dimensional	S
Comportamento à água	O
Comportamento mecânico	L
Permeabilidade ao vapor de água	E

No Quadro 2.7 são definidos os níveis mínimos (níveis de 1 a 5 progressivamente mais exigentes) de aptidão dos materiais isolantes térmicos a aplicar em sistemas de isolamento térmico pelo interior [18]. A título comparativo apresentam-se no Quadro 2.8 os valores recomendados no caso dos sistemas de isolamento térmico pelo exterior.

Quadro 2.7 – Níveis mínimos de aptidão de materiais isolantes térmicos em sistemas de isolamento térmico pelo interior (paredes exteriores) [18]

Solução	Exigência de Desempenho				
	I	S	O	L	E
Complexo pré-fabricado ou sistema executado em obra	1	2	2	3	2 ou 3 ⁱ⁾

i) Exigência para zonas I3 do RCCTE [27] e de forte higrometria (conforme definido em [41]).

Quadro 2.8 – Níveis mínimos de aptidão de materiais isolantes térmicos em sistemas de isolamento térmico pelo exterior (paredes exteriores) [18]

Solução	Exigência de Desempenho				
	I	S	O	L	E
Revestimento delgado sobre poliestireno expandido	2	4	3	4	2
Revestimento independente descontínuo	1	1	2	2	1

Refira-se a propósito que a qualidade dos sistemas do tipo directo pode ser certificada por organismos acreditados para o efeito, dos quais em França o CSTB (“Centre Scientifique et Technique du Bâtiment”) é um exemplo através da certificação CSTBat (Figura 2.1).


CERTIFICAT CSTBat DU COMPLEXE <small>CSTB : 4 Avenue du Recteur Poincaré - 75016 PARIS</small>		PERMEANCE	
		P1, P2, ou P3	
<small>Caractéristiques certifiées : se reporter au certificat en vigueur Référéntiel : RTT 07 Dimensions du complexe</small>			
<small>Nombre de complexes</small>			
RÉSISTANCE THERMIQUE DU COMPLEXE		<small>Code de l'isolant Incorporé (*) si mention 3.2.1</small>	
R =		m².K/W	
<small>Valeur de R = (R de l'isolant + R de la plaque arrondie à 0,05 m².K/W)</small>			

Figura 2.1 – Etiqueta da certificação CSTBat [19]

2.3.2 CONDENSAÇÕES INTERNAS

Em [20] definem-se várias regras de concepção para paredes de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, genericamente baseadas na limitação do fluxo de vapor que migra para as zonas mais frias da parede exterior, incluindo a eventual inclusão de uma barreira pára-vapor (material ou conjunto de materiais cuja permeância ao vapor de água não excede $5,7 \times 10^{-10} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$) [21].

Como sabido, este fluxo deverá ser tanto menor quanto maior for a higrometria do local em análise (relação entre a produção de vapor e o caudal de ventilação), menor a resistência térmica da parede de suporte, e mais desfavorável o ambiente higrotérmico exterior (temperaturas reduzidas e humidades relativas elevadas).

De acordo com Pinto [22] os fluxos condensados em sistemas de isolamento térmico pelo interior são nitidamente mais elevados do que nas paredes duplas com isolamento térmico na caixa de ar, podendo em certas circunstâncias ocorrer condensações na espessura ou na face interior do isolante térmico, mas sobretudo na face interior da parede exterior.

O mesmo autor refere ser fundamental o uso de um isolante térmico insensível à humidade, visto poderem ser produzidas quantidades condensadas susceptíveis de degradarem as suas propriedades, sendo esta possibilidade ainda mais problemática no caso de construção nova na qual o teor de humidade nos elementos construtivos será superior ao teor de humidade higroscópico. Deste modo, e corroborando a referida certificação ACERMI, recomenda-se que o isolante térmico a ser incorporado neste tipo de sistemas possua uma classificação mínima O₂ (não hidrófilo).

Na prática os elementos construtivos devem ser concebidos de modo a evitar a ocorrência de condensações internas, pois quer na espessura do material isolante térmico quer na interface deste com a parede exterior (ainda que o potencial de degradação do material que a constitui por acção da humidade seja reduzido) as suas consequências serão sempre perniciosas. Não obstante, Freitas [23] propõe para o caso de sistemas de isolamento térmico pelo interior um valor máximo de $500 \text{ g}/\text{m}^2$ para o fluxo condensado, desde que ocorra no pano de alvenaria e não existam camadas na face exterior da parede que dificultem a sua secagem durante a estação quente.

Apresentam-se no Quadro 2.9 as três regras de concepção definidas em [20] para paredes exteriores baseadas numa solução construtiva ilustrada na Figura 2.2. A primeira regra visa impedir a ocorrência de condensações na face interior do material isolante térmico, a segunda na sua espessura, e a terceira na face interior do pano exterior.

Os parâmetros utilizados são a resistência térmica R [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$], a resistência à difusão de vapor de água R_d (inverso da permeância ao vapor de água, [$\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}/\text{g}$]) e a permeância ao vapor de água Pe [$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg})$]. Note-se que a observação destas regras não garante a ausência de condensações superficiais, tão-somente as limitando a valores que não resultam numa deterioração dos materiais que constituem o elemento construtivo.

Observe-se que a primeira regra (Quadro 2.9) não possui um significado prático substantivo, pois os materiais isolantes térmicos e os elementos de revestimento interior correntemente utilizados na construção de edifícios garantem normalmente a relação recomendada. A segunda regra somente se aplica a locais de elevada higrometria, sendo que para locais de fraca e média higrometria o risco de ocorrência de condensações na espessura do isolante é tido como desprezável ou mesmo nulo, enquanto que para locais de higrometria muito elevada se recomenda um estudo específico [20].

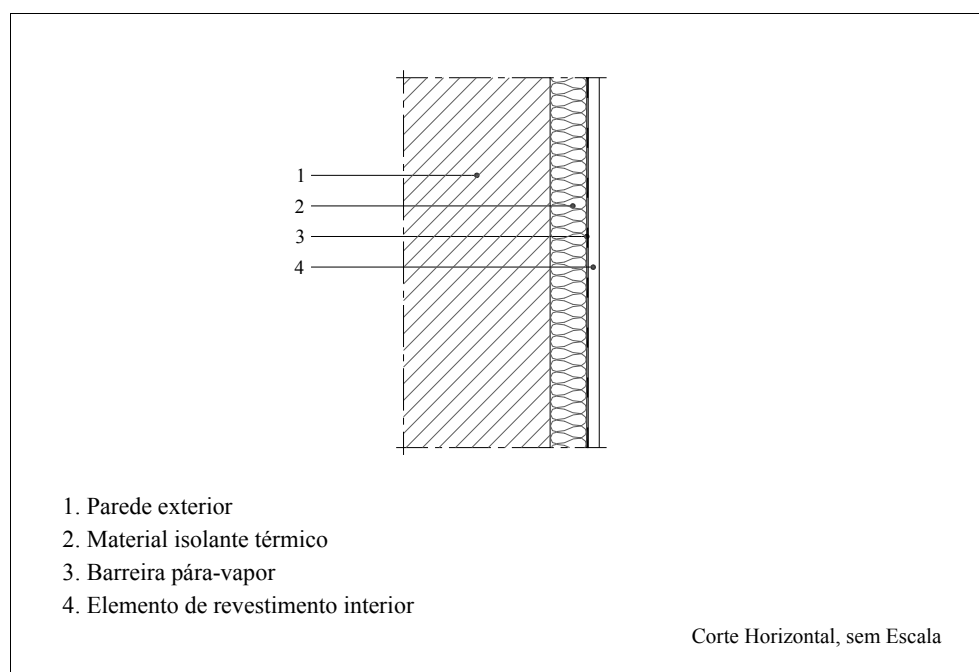


Figura 2.2 – Esquema ilustrativo dos constituintes do sistema de isolamento térmico pelo interior utilizados para a definição das regras de concepção relativas a condensações internas

Quadro 2.9 – Regras de concepção para paredes exteriores com um sistema de isolamento térmico pelo interior de modo a limitar a ocorrência de condensações internas [20]

Ref. ^a	Regra de Concepção
1	$R \text{ (Isolante Térmico)} \geq 3 \cdot R \text{ (Elemento de Revestimento Interior)}$
2	$1/(R_d \text{ (Elemento de Revestimento Interior)} + R_d \text{ (Barreira Pára-Vapor)}) < 0,06^i$
3	$3 \cdot R \text{ (Parede Exterior)} \geq R \text{ (Isolante Térmico + Elemento de Revestimento Interior)}$

i) Somente aplicável a locais de elevada higrometria

Ainda para a segunda regra, e dado que o elemento de revestimento corrente em sistemas pelo interior são as placas de gesso cartonado, cujo coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (π) é de cerca de $1200 \times 10^{-5} \text{ g/(m} \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg)}$ [21] (correspondendo, para uma espessura típica de 12,5 mm, a um valor de $P_e = 0,96 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg)}$), deverá ser inevitável a utilização de barreira pára-vapor (em locais de elevada higrometria).

Quanto a regra 3, e considerando o exemplo de uma parede exterior em alvenaria de tijolo cerâmico furado de 22 cm, cujo valor de resistência térmica é de cerca de $0,46 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$ [24], constata-se que sua aplicação ditaria uma resistência térmica máxima do sistema de isolamento térmico de cerca de $1,40 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$. Tomando um valor para a condutibilidade térmica do material isolante térmico de $0,040 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ (conservativo para a maioria dos materiais utilizados na construção nacional [24]), e desprezando a resistência térmica do elemento de revestimento interior, a espessura máxima do material isolante de modo a garantir a aplicação da regra 3 seria de 5 cm.

Nos casos de paredes exteriores com fraca resistência térmica, isto é, em que $R \text{ (Isolante Térmico + Elemento de Revestimento Interior)}$ é superior a $3 \times R \text{ (Parede Exterior)}$, devem adoptar-se as regras de concepção apresentadas no Quadro 2.10.

Quadro 2.10 – Regras de concepção existentes ao nível das condensações internas para paredes exteriores com fraca resistência térmica de modo a limitar a ocorrência de condensações internas [20]

Ref. ^a	Condição	Regra de Concepção
1	$R \text{ (Parede Exterior)} > 0,086 \text{ m}^2\cdot\text{°C/W}^{\text{i)}$	$1/(R_d \text{ (Restantes Componentes Construtivos)}) < 0,3^{\text{ii)}$
2	$R \text{ (Parede Exterior)} < 0,086 \text{ m}^2\cdot\text{°C/W}^{\text{i)}$	$1/(R_d \text{ (Restantes Componentes Construtivos)}) < 0,06^{\text{ii)}$
3	Zonas muito frias ⁱⁱⁱ⁾	$1/(R_d \text{ (Restantes Componentes Construtivos)}) < 0,015^{\text{ii)}$

i) Equivalente a uma parede de betão com 15 cm de espessura, sendo igualmente garantida por qualquer espessura comercial de tijolo cerâmico furado ou bloco de betão;

ii) R_d referente ao isolante térmico, revestimento e considerando a eventual integração de uma barreira pára-vapor;

iii) De acordo com [22] em Portugal corresponderão exclusivamente à zona da Serra da Estrela.

Em [25] são definidas classes de permeância para os complexos constituídos por uma placa de gesso cartonado e um material isolante térmico aderido (Quadro 2.11). Constata-se que por exemplo para garantir a regra 2 (Quadro 2.9) utilizando um sistema do tipo directo, deverá optar-se por uma solução que garanta no mínimo uma classe de permeância P2.

Quadro 2.11 – Classes de permeância em complexos de gesso cartonado e isolante térmico [25]

Classe	Pe [g/(m ² ·h·mmHg)]
P1	Superior a 0,06
P2	Compreendida entre 0,015 e 0,06
P3	Igual ou inferior a 0,015

2.3.3 PONTES TÉRMICAS

De acordo com a perspectiva de análise aprofundada no subcapítulo 4.3, efectua-se uma síntese do estado de conhecimento neste domínio a dois níveis:

- Acréscimo das perdas térmicas para o exterior – vertente sustentabilidade;
- Ocorrência de condensações superficiais – vertente habitabilidade.

2.3.3.1 ACRÉSCIMO DE PERDAS TÉRMICAS PARA O EXTERIOR

Tal como foi já referido, a abordagem científica relativa ao desempenho higrotérmico dos sistemas de isolamento térmico pelo interior efectua-se frequentemente pela comparação com os seus congéneres aplicados pelo exterior.

Num estudo realizado pelo CSTB [26], salienta-se que devido ao fenómeno das pontes térmicas cuja incidência é naturalmente superior nos sistemas interiores, para uma dada espessura de isolante térmico as perdas térmicas para o exterior serão invariavelmente inferiores nos sistemas exteriores. Por outro lado, e numa perspectiva do cumprimento de um determinado requisito de desempenho térmico (ex. necessidades de aquecimento) o sistema interior conduzirá a espessuras mais elevadas de material isolante térmico.

No mesmo estudo é avaliada a importância relativa das pontes térmicas nos dois sistemas recorrendo à análise da ligação de uma parede exterior com duas lajes intermédias de pavimento e com duas paredes interiores. O isolamento pelo interior é materializado por um complexo constituído por uma placa de gesso cartonado de 10 mm e um material isolante térmico (não especificado), sendo pelo exterior utilizada a mesma espessura de isolante térmico (embora com um valor de condutibilidade térmica superior) e uma solução de revestimento não especificada. Em ambos os casos são considerados 3 níveis de desempenho caracterizados por valores de resistência térmica distintos consoante o tipo de sistema (Quadro 2.12).

Quadro 2.12 – Valores de resistência térmica do material isolante térmico considerados na avaliação da influência das pontes térmicas [26]

Tipo de Sistema de Isolamento Térmico	Interior			Exterior		
	1,50	2,00	2,90	1,10	1,40	2,00
Resistência Térmica, R [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$]						

A parede exterior possui uma área de $4,0 \times 2,5 \text{ m}^2$, sendo os elementos construtivos de contorno (paredes laterais, varanda e laje de tecto) em betão armado com 0,20 m de espessura. A avaliação da gravidade associada à ocorrência das pontes térmicas efectuou-se para uma fachada típica de um compartimento num edifício residencial (Figura 2.3).

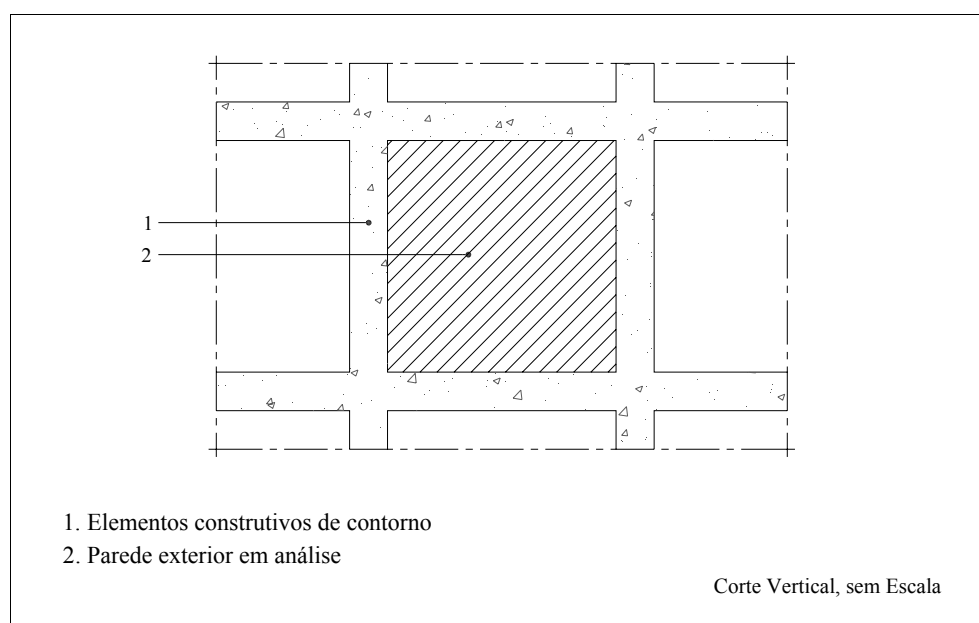


Figura 2.3 – Esquema ilustrativo da situação analisada no estudo do CSTB relativo à avaliação da ocorrência de pontes térmicas [26]

No Quadro 2.13 encontram-se compilados os diversos resultados obtidos recorrendo aos conceitos de coeficiente de transmissão térmica linear na zona de ponte térmica (k), coeficiente de transmissão térmica global da fachada (U) (Equação 2.1) e da importância das perdas térmicas em zona da ponte térmica face às perdas térmicas globais da fachada (r) (Equação 2.2). É de salientar não ter sido considerada qualquer tipo de correcção das pontes térmicas para o sistema de isolamento térmico pelo interior (bem como para o sistema exterior).

$$U = U_{el} + \frac{\sum k_i \cdot L_i}{A_{fc}} \quad (2.1)$$

Sendo,

U – coeficiente de transmissão térmica global da fachada, $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$;

U_{el} – coeficiente de transmissão térmica do elemento construtivo, $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$;

k_i – coeficiente de transmissão térmica linear na zona de ponte térmica i , $[W/(m \cdot ^\circ C)]$;

L_i – dimensão da zona de ponte térmica i , $[m]$;

A_{fc} – área da fachada, $[m^2]$.

$$r = \frac{\sum k_i \cdot L_i}{U \cdot A_{fc}} (\times 100) \quad (2.2)$$

Sendo,

r – importância das perdas em zona de ponte térmica face às perdas globais da fachada[%];

k_i – coeficiente de transmissão térmica linear na zona de ponte térmica i , $[W/(m \cdot ^\circ C)]$;

L_i – dimensão da zona de ponte térmica i , $[m]$;

U – coeficiente de transmissão térmica global da fachada, $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$;

A_{fc} – área da fachada, $[m^2]$.

Os resultados obtidos (Quadro 2.13) permitem constatar que enquanto no caso do sistema interior as perdas por efeito das pontes térmicas representam entre 57 a 72% das perdas térmicas globais da fachada, para o sistema exterior o seu valor varia entre 28 e 39%, ou seja, diminui para cerca de metade. Como é conhecido, esta percentagem aumenta com a melhoria do isolamento térmico da zona corrente, aspecto particularmente delicado para a qualidade térmica global da envolvente.

Note-se que para o sistema exterior a percentagem das perdas térmicas em zona de ponte térmica seria substancialmente inferior caso fosse suprimida a varanda (Quadro 2.13) com um valor máximo de 11%, enquanto que no caso do sistema interior, para a mesma configuração, as perdas térmicas se mantêm invariáveis (sem correcção).

Quadro 2.13 – Resultados da avaliação da influência das pontes térmicas em sistemas de isolamento interior e exterior [26]

		Sistema Interior			Sistema Exterior		
R Isolante Térmico [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$]		1,50	2,00	2,90	1,10	1,40	2,00
Zona Corrente	U corrente [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]	0,55	0,43	0,31	0,71	0,59	0,43
Zona de Ponte Térmica	k parede int. [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]	0,43	0,45	0,46	0,06	0,05	0,04
	k laje [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]	0,43	0,45	0,46	0,06	0,05	0,04
	k varanda [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$]	0,43	0,45	0,46	0,39	0,40	0,42
Resultados com varanda	U global [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]	1,29	1,20	1,10	0,99	0,86	0,70
	r (%)	57	64	72	28	32	39
Resultados sem varanda	U global [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]	1,29	1,20	1,10	0,79	0,66	0,48
	r (%)	57	64	72	10	10	11

Atente-se ainda que enquanto que no caso do sistema interior o valor do coeficiente de transmissão térmica superficial (k) aumenta com a espessura de isolante térmico, já para o sistema exterior essa variação é inversa, justificando assim que a variação relativa da percentagem de perda térmica em zona de perda térmica à medida que se incrementa a espessura do material isolante térmico seja superior no caso do sistema interior.

Actualmente, a nível europeu e igualmente na regulamentação térmica nacional [27], a avaliação do acréscimo das perdas térmicas para o exterior (ou para espaços não aquecidos) por efeito de uma ponte térmica efectua-se a partir do parâmetro ψ [28], denominado de coeficiente de transmissão térmica linear (da ponte térmica linear).

Conceptualmente o valor de ψ corresponde ao acréscimo da perda térmica que ocorre numa zona de ponte térmica comparativamente à perda térmica em zona corrente, por unidade de comprimento de ponte térmica. Poderá proceder-se ao seu cálculo através da quantificação do coeficiente de transmissão térmica (U) com e sem ponte térmica (numa situação real ou sob condições laboratoriais), ou igualmente por modelos numéricos de transferência de calor, a duas ou três dimensões, consoante a complexidade do edifício e da situação em análise (Equação 2.3) (Figura 2.4).

$$\psi = \frac{\phi - (U_1 \cdot l_1 \cdot \Delta T_1 + U_2 \cdot l_2 \cdot \Delta T_2)}{\Delta T} \quad (2.3)$$

Sendo,

ψ – Coeficiente de transmissão térmica linear (da ponte térmica linear), [W/(m·°C)];

ϕ – Fluxo térmico total da ponte térmica linear, [W];

U_i – coeficiente de transmissão térmica do elemento i , [W/(m²·°C)];

l_i – dimensão do elemento i no sistema de dimensões definido, [m];

ΔT_i – diferença de temperatura ambiente em cada face do elemento i , [°C].

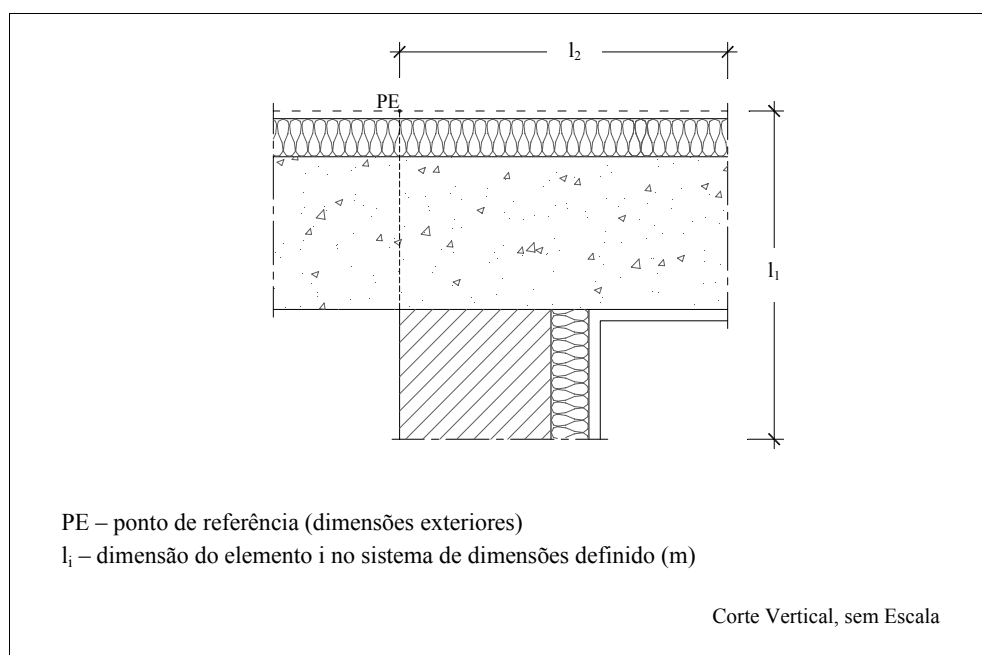


Figura 2.4 – Exemplo de avaliação do parâmetro ψ numa ligação entre uma cobertura plana e uma fachada com isolamento térmico pelo interior [29]

Apresenta-se no Quadro 2.14 uma classificação do efeito de uma ponte térmica ao nível do acréscimo de perdas térmicas para o exterior baseada no parâmetro de avaliação ψ [30]:

Quadro 2.14– Classificação do efeito da ponte térmica nas condições de sustentabilidade [30]

Classe	C1	C2	C3	C4
ψ [W/(m·°C)]	< 0,10	0,10-0,25	0,25-0,50	≥ 0,50
Efeito Potencial	Negligenciável	Reduzido	Elevado	Muito elevado

Convém esclarecer que a avaliação do efeito de uma ponte térmica através do parâmetro ψ se deve realizar de uma forma prudente, pois a um valor elevado de ψ não corresponde necessariamente uma ponte térmica importante, dependendo a gravidade a ela associada da sua extensão que normalmente coincide com uma das dimensões da parede exterior.

Por outro lado, o valor de ψ depende do sistema de dimensões definido (interior ou exterior) para o cálculo das áreas para a transferência de calor unidimensional, podendo deste modo assumir valores inferiores a zero, sobretudo quando as perdas térmicas em zona corrente são calculadas através das dimensões exteriores (Figuras 2.5 e 2.6).

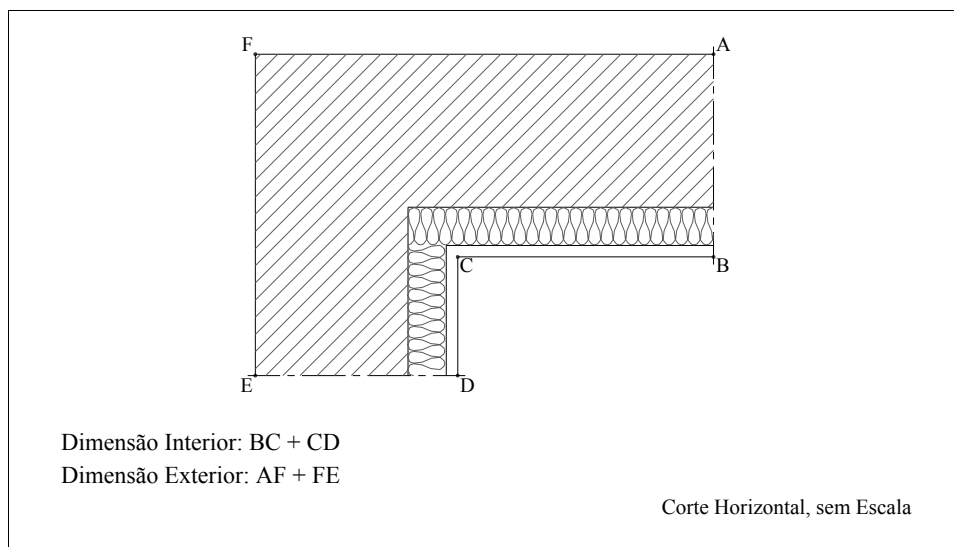


Figura 2.5 – Exemplo 1 da utilização de dimensões interiores ou exteriores [30]

Note-se ainda que desde que seja conhecido o valor de ψ para um sistema de dimensões é possível calculá-lo para um qualquer outro sistema (Equação 2.4) (Figura 2.7).

$$\psi_{\text{ext}} = \psi_{\text{int}} - \frac{U_1 \cdot \Delta l_1 \cdot \Delta T_1 + U_2 \cdot \Delta l_2 \cdot \Delta T_2}{\Delta T} \quad (2.4)$$

Sendo,

ψ_{ext} - transmissão térmica linear da ponte térmica linear (dimensões exteriores) [W/(m·°C)];

ψ_{int} - transmissão térmica linear da ponte térmica linear (dimensões interiores), [W/m·°C];

U_i – coeficiente de transmissão térmica do elemento i, [W/(m²·°C)];

Δl_i – diferença de comprimento do elemento i entre os dois sistemas de dimensões, [m];

ΔT_i – diferença de temperatura ambiente em cada face do elemento i, [°C].

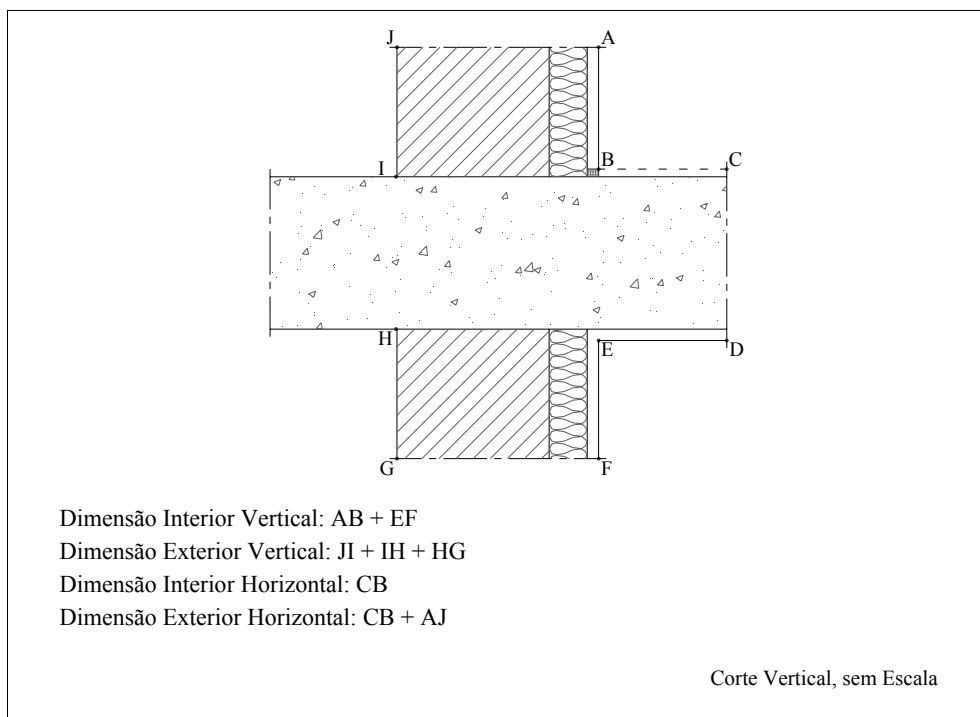


Figura 2.6 – Exemplo 2 da utilização de dimensões interiores ou exteriores [30]

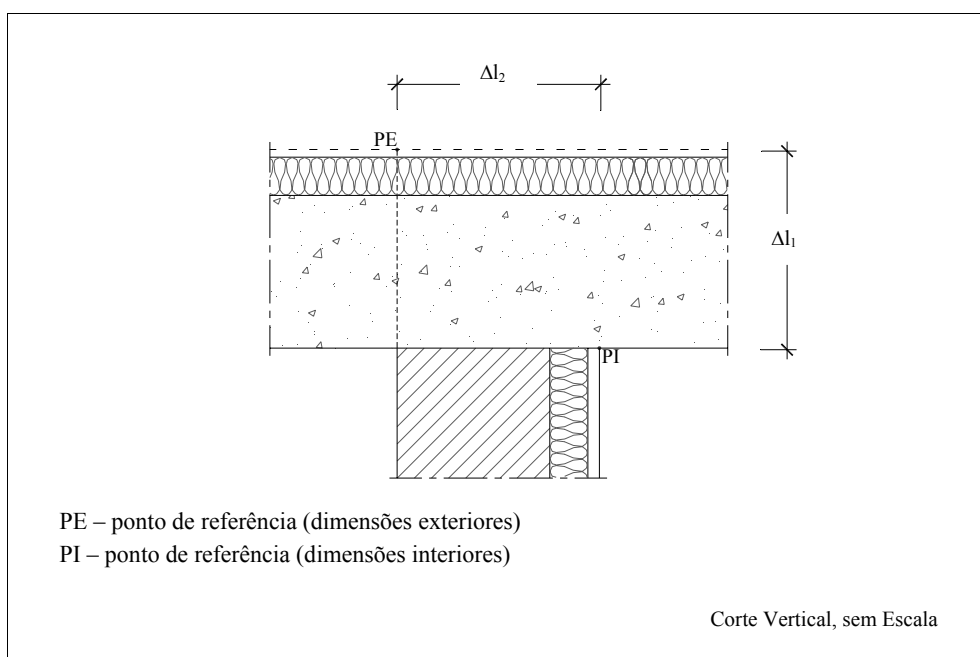


Figura 2.7 – Transposição do valor de ψ entre sistemas de dimensões distintos [29]

É prática corrente em diversos países europeus a elaboração, inclusive com possibilidade de utilização para efeitos de verificação regulamentar, de catálogos de pontes térmicas, dos quais constam, entre outras situações, valores do parâmetro ψ para diversas configurações construtivas envolvendo sistemas de isolamento térmico pelo interior.

De acordo com [30] a incerteza associada à utilização de um catálogo de pontes térmicas poderá atingir um valor de 20% enquanto que a simulação numérica através de programas devidamente testados assegura valores de incerteza inferiores a 5%. Apresenta-se na Figura 2.8 um exemplo retirado de um catálogo de pontes térmicas constante da legislação Suíça [29] para uma situação envolvendo um sistema de isolamento térmico pelo interior (valores calculados com base em dimensões exteriores).

Dalle continue sur appui		2.1-I1	
	Valeur U façade en $W/(m^2 \cdot K)$	Mur	Valeur ψ en $W/(m \cdot K)$
		Brique t.c.	Béton armé
	0.15	0.63	0.71
	0.20	0.68	0.78
	0.25	0.71	0.83
	0.30	0.73	0.86
	0.35	0.74	0.88
	0.40	0.74	0.89
Conditions standard		Majorations	
Chauffage par le sol	Non	Chauffage par le sol + 0.07 $W/(m \cdot K)$	
Isolation sous bord de dalle	Non	Isolation sous bord de dalle (2 x 50 cm) sans isolation tête de dalle - 0.13 $W/(m \cdot K)$	
Isolation tête de dalle	Non	Isolation tête de dalle 4 cm sans isolation sous bord de dalle - 0.20 $W/(m \cdot K)$	
		Isolation sous bord de dalle (2 x 50 cm) avec isolation tête de dalle 4 cm - 0.28 $W/(m \cdot K)$	

Figura 2.8 – Exemplo de resultados de um catálogo de pontes térmicas para uma ligação entre uma parede exterior com isolamento térmico pelo interior e uma laje intermédia [29]

Observa-se que os valores do parâmetro ψ variam significativamente com o coeficiente de transmissão térmica (U) da parede exterior, pelo que a transposição destes resultados (ou de outros provenientes de fontes bibliográficas similares) para a realidade construtiva nacional será meramente indicativa da eventual gravidade de uma ponte térmica.

Em Portugal salienta-se ao nível da bibliografia neste domínio a elaboração de um catálogo de pontes térmicas por Corvacho [31], que apresenta valores para o índice ψ baseado em dimensões exteriores para um vasto conjunto de configurações construtivas correntes, entre as quais estão contempladas diversas configurações construtivas relativas ao sistema de isolamento térmico pelo interior.

2.3.3.2 CONDENSAÇÕES SUPERFICIAIS

A avaliação do efeito das pontes térmicas quanto à probabilidade de ocorrência de condensações superficiais tem igualmente merecido atenção por parte do meio científico nacional, sendo de referir o estudo sistemático do fenómeno num vasto conjunto de configurações construtivas típicas de edifícios residenciais elaborado por Corvacho [32] e, mais recentemente, a identificação das patologias mais frequentes em zonas de ponte térmica, o seu diagnóstico, e a definição de propostas construtivas de reabilitação, elaborada por Abreu [33].

Em ambos os trabalhos procedeu-se à simulação numérica de variadas configurações construtivas (no caso de Corvacho [32] com o programa “Conduc” (desenvolvido pela própria), e no caso de Abreu [33] com o programa “Kobra”), contemplando, entre outras, diversas situações referentes a sistemas de isolamento térmico pelo interior. As conclusões de ambas as autoras confirmam algumas debilidades deste sistema particularmente quando comparado com o sistema exterior. Citando Corvacho [32], Abreu [33] salienta como situações particularmente gravosas as ligações entre uma parede exterior com uma laje de cobertura e com uma laje de pavimento sobre um espaço exterior, referindo ainda as situações de ligação da parede exterior com a caixilharia e com a caixa de estore como potencialmente problemáticas.

Em [31] sugere-se um processo (embora, como acentuado pela autora, de difícil realização prática) para atenuar o efeito das pontes térmicas em sistemas de isolamento térmico pelo interior, através da utilização de um revestimento superficial com uma condutibilidade térmica elevada, permitindo assim uma maior dispersão do fluxo de calor. De facto, a autora conclui que por exemplo na ligação entre duas paredes exteriores o factor de temperatura superficial baixa de 0,35 para 0,25 com o incremento do coeficiente de condutibilidade térmica de 0,35 para 3,00 W/(m.°C), tendo obtido uma variação similar (0,55 para 0,50) na ligação entre uma parede exterior e uma cobertura horizontal.

Actualmente, a metodologia mais corrente, a nível europeu, para a avaliação da probabilidade de ocorrência de condensações superficiais utiliza como descritor de desempenho o índice f_{Rsi} , denominado de factor de temperatura [34] (Equação 2.5).

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (2.5)$$

Sendo:

θ_{si} – temperatura do ponto da superfície interior onde se pretende calcular f_{Rsi} , [°C];

θ_e – temperatura do ambiente exterior, [°C];

θ_i – temperatura do ambiente interior, [°C].

Da Equação 2.5 conclui-se que quanto maior for o factor de temperatura f_{Rsi} maior será a diferença entre a temperatura superficial interior e a temperatura exterior, o que significa que para condições higrotérmicas interiores e exteriores constantes, a probabilidade de ocorrência de condensações superficiais variará de forma inversa ao factor de temperatura, diminuindo à medida que este aumenta e vice-versa.

Assim não se poderá estabelecer um critério objectivo que permita garantir a ausência de condensações superficiais somente com base no factor de temperatura, uma vez que para um dado valor de f_{Rsi} a temperatura de ponto de orvalho Θ_{dp} (abaixo da qual ocorrem condensações superficiais) será variável em função da variação das condições de humidade e temperaturas interior e exterior.

Um exemplo sintomático do referido é um documento francês de boa prática construtiva referido em [30] no qual o factor de temperatura f_{Rsi} mínimo sugerido de modo a evitar a ocorrência de condensações superficiais depende da higrometria interior do compartimento em análise (considerando uma temperatura exterior de 0°C, humidade relativa exterior de 80% e temperatura interior de 18 °C):

- $f_{Rsi} > 0,25$ para uma higrometria menor ou igual a 2,5 g/m³;
- $f_{Rsi} > 0,52$ para uma higrometria compreendida entre 2,5 g/m³ e 5,0 g/m³;
- $f_{Rsi} > 0,73$ para uma higrometria compreendida entre 5,0 g/m³ e 7,0 g/m³.

Como exemplos de outros valores de referência neste domínio podem citar-se os definidos na regulamentação belga – $f_{0,20} \geq 0,70$ – e holandesa – $f_{0,50} \geq 0,65$ [30].

2.3.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO EM REGIME VARIÁVEL

Tal como é conhecido, a análise do desempenho térmico de um edifício admitindo um regime permanente apenas conduz a resultados fidedignos para edifícios de construção massiva tradicional, com uma temperatura interior aproximadamente constante e reduzidos ganhos solares, recomendando-se para os demais casos uma avaliação em regime variável.

2.3.4.1 INÉRCIA TÉRMICA E ADMITÂNCIA TÉRMICA

O conceito de inércia térmica aplicado à envolvente exterior de um edifício pretende traduzir a capacidade dos elementos construtivos que a constituem de retardar e atenuar a transmissão ao ambiente interior de uma dada solicitação térmica exterior (normalmente associada à variação de temperatura e sobretudo resultante da radiação solar), sendo factores determinantes a sua capacidade de armazenamento e de restituição de calor.

Sob o ponto de vista físico interessam sobretudo para a compreensão deste fenómeno os conceitos de capacidade e de difusividade térmicas (respectivamente Equações 2.6 e 2.7).

$$C = c \times \rho \quad (2.6)$$

Sendo:

C – capacidade térmica, [Wh/(m³·°C)];

c – calor específico, [Wh/(kg·°C)];

ρ – massa volúmica, [kg/ m³].

$$d = \frac{\lambda}{C} \quad (2.7)$$

Sendo:

d – difusividade térmica, [m²/h];

λ – coeficiente de condutibilidade térmica, [W/(m·°C)];

C – capacidade térmica, [Wh/(m³·°C)].

A capacidade térmica corresponde à quantidade de calor armazenada quando a temperatura do material se eleva em 1 °C, traduzindo a propensão de um material construtivo para o armazenamento de calor. Complementarmente, a difusividade térmica permite caracterizar a velocidade à qual o calor se propaga, por condução, através de um corpo, traduzindo a sua capacidade de retardar a transmissão de calor. É possível assim estabelecer um paralelo entre as noções de amortecimento e de capacidade térmica, bem como entre as de desfasamento e de difusividade térmica.

O conceito de admitância térmica (também designado por “inércia de absorção” [8] em oposição à “inércia de transmissão”) corresponde à taxa de fluxo de calor entre a superfície interna de um elemento construtivo e o ar, por unidade de variação de temperatura interior (sendo expresso em $[W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$) [35] [36]. Assim, quanto maior for a admitância térmica menos imediato será o efeito do aquecimento ou arrefecimento ambiente na temperatura dos paramentos de um compartimento. Sob o ponto de vista físico, a compreensão deste fenómeno assenta, para além da capacidade e da difusividade térmicas, na propriedade designada por efusividade térmica (Equação 2.8).

$$Ef = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad (2.8)$$

Sendo:

Ef – efusividade térmica, $[Wh^{0,5}/(m^2 \cdot ^\circ C)]$;

λ – coeficiente de condutibilidade térmica, $[W/(m \cdot ^\circ C)]$;

ρ – massa volúmica, $[kg/m^3]$;

c – calor específico, $[Wh/(kg \cdot ^\circ C)]$.

A efusividade térmica caracteriza a capacidade dos materiais construtivos absorverem calor com maior ou menor rapidez, em face por exemplo de um ganho de calor interno ou da incidência da radiação solar. Para efeitos de uma inércia térmica interior forte interessará pois um valor de efusividade térmica elevada, já que as soluções com uma elevada efusividade térmica apresentam normalmente também uma boa capacidade de armazenamento de calor, evitando assim situações de sobreaquecimento [37].

Apresentam-se no Quadro 2.15 valores característicos dos parâmetros atrás definidos para alguns materiais correntes de modo a constatar-se as suas diferenças de comportamento.

Quadro 2.15 – Valores característicos da capacidade, difusividade e efusividade térmicas de alguns materiais construtivos [37]

Material	c [Wh/(kg·°C)]	C [Wh/(m ³ ·°C)]	d [m ² /h]	Ef [Wh ^{0,5} /(m ² ·°C)]
Betão (2300 kg/m ³)	0,26	600	2,93×10 ⁻³	32,3
Tijolo Terra Cota (1900 kg/m ³)	0,24	455	2,53×10 ⁻³	22,9
Alumínio (2700 kg/m ³)	0,26	695	330×10 ⁻³	400
Lã Mineral (15 kg/m ³)	0,23	3,5	11,4×10 ⁻³	0,4

O conceito de factor de resposta de um edifício (f_r), traduzido pela Equação 2.9, é muitas vezes utilizado para caracterizar o seu comportamento face a uma variação térmica [38]. Um edifício apresenta uma resposta tida como “rápida” para valores de f_r inferiores a 4 (tipicamente construção leve, do tipo gesso cartonado ou madeira), ou tida como “lenta” para valores de f_r superiores a 4 (tipicamente construção tradicional pesada).

$$f_r = \frac{\sum_i S_i Y_i + 1/3 nV}{\sum_i S_i U_i + 1/3 nV} \quad (2.9)$$

Sendo:

f_r – factor de resposta, [-];

S – área do elemento i , [m²];

Y – admitância térmica do elemento i , [W/(m²·°C)];

n – número de renovações de ar por hora, [h⁻¹];

V – volume, [m³];

U – coeficiente de transmissão térmica do elemento i , [W/(m²·°C)].

Em [8] refere-se que devido ao conhecido efeito de redução da massa útil da envolvente com capacidade de armazenamento de calor resultante da introdução de um sistema de isolamento térmico pelo interior, a sua utilização poderá ser mais desfavorável em termos energéticos do que o não isolamento, sendo (eventualmente) preferível em tal situação aumentar a espessura da alvenaria que constitui a fachada.

Já Appleton [14] salienta, no âmbito de intervenções de reabilitação em edifícios antigos, que a manutenção da inércia da parede exterior será mais eficaz em edifícios com aquecimento contínuo. Em regimes de aquecimento intermitente o autor advoga que a aplicação de isolamento térmico pelo interior terá maior interesse, visto que este impede que a energia fornecida seja imediatamente absorvida pela parede exterior, reduzindo-se assim o tempo de aquecimento necessário. Porém, uma envolvente com inércia elevada implica também que durante a noite a temperatura interior decresça mais lentamente, justamente em situações de aquecimento intermitente [39].

Igualmente em [39] adverte-se para uma outra situação na qual a existência de uma envolvente construtiva com uma inércia térmica interior elevada num contexto habitacional poderá ser prejudicial. Tratam-se de habitações de utilização ocasional (ex. fim de semana) com elevadas necessidades de aquecimento, nas quais a inércia poderá impedir que a temperatura da envolvente interior alcance um valor de conforto em tempo útil, sendo o calor acumulado desperdiçado ao longo da semana já com a habitação desocupada.

Em [40] é referido que a utilização de uma inércia forte obriga a antecipar o horário de funcionamento dos sistemas de aquecimento intermitente face ao da ocupação do edifício, embora se saliente que desde que essa programação seja adequada este facto não se traduz num sobreconsumo significativo. Por outro lado esclarece-se que, sobretudo para os meses de Verão em climas com elevadas necessidades de arrefecimento, a importância de uma inércia interior elevada depende da área de envidraçados, da ventilação nocturna e das protecções solares previstas.

2.3.4.2 VARIAÇÕES DE TEMPERATURA

No estudo do CSTB anteriormente referido [26] são avaliadas as variações de temperatura a que uma parede exterior (orientação Oeste) fica sujeita num ciclo de 5 dias de Inverno e 5 dias de Verão (em ambos os casos procurando simular solicitações climáticas padrão), utilizando dados climáticos referentes à estação de Trappes, França.

A parede exterior é constituída por um pano simples em betão armado com uma espessura de 15 cm, 6 cm de material isolante térmico e uma placa de gesso cartonado para o sistema de isolamento térmico pelo interior, e 5 cm de material isolante térmico e 1 cm de reboco (interior e exterior) para o sistema de isolamento térmico pelo exterior.

A temperatura interior foi considerada constante – 24 °C no Verão e 20 °C no Inverno – e o coeficiente de absorção da radiação solar do revestimento da parede exterior igual a 0,70.

Seguidamente são compilados os valores relativos aos dados climáticos (temperatura exterior e radiação solar) considerados nas simulações para um dia típico de Inverno e de Verão (Quadros 2.16 e 2.17).

Quadro 2.16 – Dados climáticos (temperatura exterior e radiação solar) considerados na simulação para um dia típico de Inverno [26]

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T [°C]	-0,8	-0,2	-0,1	-0,5	-1,4	-1,6	-1,8	-2,0	-2,2	-2,0	-1,7	-1,1
R [W/m ²]	0	0	0	0	0	0	0	1,5	9,6	26,8	24,5	38,5
Hora	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T [°C]	-0,9	-1,5	-1,8	-1,8	-2,1	-2,2	-2,7	-2,9	-2,7	-2,4	-1,9	-1,9
R [W/m ²]	32,8	15,0	10,0	5,0	1,7	0	0	0	0	0	0	0

Quadro 2.17 – Dados climáticos (temperatura exterior e radiação solar) considerados na simulação para um dia típico de Verão [26]

Hora	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T [°C]	19,2	18,3	17,1	15,9	14,6	15,7	17,8	19,8	21,8	23,3	24,7	26,3
R [W/m ²]	0	0	0	0	0	16,3	50,7	79,2	105,0	127,5	152,8	153,5
Hora	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
T [°C]	27,8	28,3	29,3	28,9	28,5	28,4	26,7	24,9	23,1	22,2	21,2	20,2
R [W/m ²]	226,9	390,2	486,9	406,3	607,1	608,6	191,4	19,2	0	0	0	0

Os resultados obtidos por simulação numérica [26] são apresentados no Quadro 2.18.

Quadro 2.18 – Temperaturas mínimas e máximas atingidas numa parede exterior com sistemas de isolamento térmico pelo interior e pelo exterior [26]

		Superfície Exterior	Pano de Betão	Superfície Interior
Isolamento Interior				
Inverno	T _{Mínima} [°C]	-1,60	0,55	18,95
	T _{Máxima} [°C]	0,25	2,60	19,00
Verão	T _{Mínima} [°C]	19,20	21,50	23,90
	T _{Máxima} [°C]	45,30	39,30	24,75
Isolamento Exterior				
Inverno	T _{Mínima} [°C]	-1,95	17,50	18,60
	T _{Máxima} [°C]	1,05	17,80	18,65
Verão	T _{Mínima} [°C]	15,54	23,95	24,00
	T _{Máxima} [°C]	52,00	25,40	24,80

Constata-se que para as simulações referentes ao Verão a diferença máxima de temperatura a que se encontra sujeito o pano de betão é de 17,8 °C (39,30-21,50) no caso do isolamento interior enquanto que no caso do isolamento exterior o valor é de cerca de 1,5 °C (25,40-23,95), ou seja, quase 12 vezes inferior. Por sua vez o revestimento exterior é mais solicitado no sistema exterior, embora a magnitude entre os dois sistemas seja inferior.

Já para o Inverno, e apesar do quociente entre as diferenças de temperatura ser ainda aproximadamente igual a 7, os valores absolutos são bastante mais reduzidos. No entanto verifica-se que a diferença entre estações climáticas é muito mais acentuada no caso do sistema de isolamento térmico pelo interior.

Por conseguinte conclui-se que o tipo de solução construtiva da parede de base em sistemas de isolamento térmico pelo interior deverá ser necessariamente mais robusta do que nos sistemas exteriores, atendendo à magnitude das solicitações de natureza térmica.

Em consequência do exposto, e adaptando uma classificação estabelecida pelo DTU 20.1 para soluções construtivas tradicionais francesas, Freitas [41] define as espessuras mínimas para paredes exteriores em função da posição do material isolante térmico (Quadro 2.19), com a ressalva dos tijolos e os blocos de betão necessitarem de ser caracterizados no que respeita à sua estabilidade dimensional (solicitações temperatura e humidade).

Quadro 2.19 – Espessuras mínimas do pano exterior de parede em função da posição do material isolante térmico [41]

Solução Construtiva	Tijolo	Betão	Bloco de Betão
Parede simples com isolamento interior	22 cm	15-20 cm	25 cm
Parede simples com isolamento exterior	22 cm	15-20 cm	20 cm
Parede dupla (espessura do pano exterior)	15 cm	15 cm	20 cm

2.4 OUTRAS EXIGÊNCIAS DE DESEMPENHO

Efectua-se neste ponto uma breve síntese do estado de conhecimento actual acerca da influência do sistema de isolamento térmico pelo interior em exigências de desempenho complementares ao item “energia e conforto higrotérmico”. Visto que o presente trabalho se concentra no item supracitado sendo os seus diversos aspectos aprofundados ao longo da exposição, entendeu-se proceder neste ponto a um enquadramento técnico preliminar à análise propriamente dita para algumas das demais exigências de desempenho.

2.4.1 HIGIENE, SAÚDE E MEIO AMBIENTE

A salvaguarda da higiene e saúde dos ocupantes (ambiente interior) de um edifício, evitando materiais que potenciem a libertação de substâncias nocivas ou insalubres (gases, poeiras, fungos), e a redução do impacto ambiental associado ao conjunto dos produtos utilizados (ambiente exterior), são actualmente objectivos primordiais a considerar na sua concepção. Ambos os aspectos devem ser incorporados ponderando a totalidade do ciclo de vida do edifício (construção, utilização e demolição).

No estado de conhecimento actual, e quando correctamente aplicadas, não é relacionável a utilização de placas de gesso cartonado (principal elemento de revestimento dos sistemas em estudo) com o aparecimento de sintomas indicativos de patologias ao nível da higiene e saúde. Pelo contrário, o gesso cartonado possui características higroscópicas que permitem reduzir a humidade interior pelo aumento da sua inércia hídrica, factor que contribui para a diminuição da probabilidade de ocorrência de condensações superficiais.

Quanto ao material isolante térmico, deverá primar-se pela utilização de materiais com uma baixa energia de embebição (fabricação) e recicláveis ou reutilizáveis após a sua demolição ou desmontagem. No Quadro 2.20, adaptado de [42], apresenta-se um exemplo do balanço energético de materiais isolantes térmicos correntes.

Quadro 2.20 – Balanço energético de diversos materiais isolantes térmicos [42]

Material	Densidade [kg/m³]	Condutibilidade [W/(m.°C)]	Consumo de Energia Não Renovável [kWh/m³]
Poliestireno	15-30	0,035-0,040	530-1050
Poliuretano	30-35	0,020-0,035	1140-1330
Lã mineral	20-140	0,035-0,045	100-700
Celulose	40-70	0,045	10-17
Fibras madeira	190-240	0,045-0,053	590-785

O mesmo estudo refere, para a Europa Central, uma amortização energética (intervalo de tempo mínimo para que a energia economizada seja equivalente à energia dispendida no processo produtivo) máxima de 13 meses para materiais à base de lã mineral, o que considerando um tempo de serviço de cerca de 30 anos para o material isolante térmico não é significativo (ressalve-se que este valor pressupõe um aquecimento contínuo e um cenário climático desfavorável como o da Europa Central).

Foi recentemente publicada em França a norma NF P01-010 [43], que veio substituir a versão experimental de 2001, relativa às características ambientais, de higiene e saúde dos produtos de construção, sendo já corrente a aplicação da versão experimental (já que a versão definitiva data de Dezembro de 2004) para variados produtos comerciais, entre os quais os sistemas de isolamento térmico pelo interior.

Os principais aspectos constates do documento normativo são resumidos no Quadro 2.21 para um exemplo relativo a uma solução comercial [44]. Note-se que a análise do Quadro 2.21 somente permite avaliar de um modo genérico o tipo de questões colocadas pela normalização, já que a avaliação efectuada em [44] é extremamente detalhada, excedendo largamente o propósito deste ponto do trabalho.

Quadro 2.21 – Principais aspectos analisados na avaliação ambiental, de higiene e saúde de um sistema de isolamento térmico pelo interior [44]

Item de Avaliação	Aspectos Analisados	
Indicadores de Impacte Ambiental	Consumo de recursos energéticos [MJ]	
	Consumo de recursos não energéticos [MJ]	
	Consumo de água [l]	
	Resíduos sólidos (valorizados e eliminados) [kg]	
	Alterações climáticas [kg eq. CO ₂]	
	Acidificação atmosférica [kg eq. SO ₂]	
	Poluição do ar [m ³]	
	Poluição da água [m ³]	
	Poluição dos solos (sem implicação)	
	Destruição da camada de ozono da estratosfera (sem implicação)	
	Formação do ozono fotoquímico [kg eq. Etileno]	
	Implicações na biodiversidade (sem implicação)	
Contribuição para o controlo de riscos sanitários	Espaços interiores	Exposição a poluentes pelos aplicadores
		Exposição a poluentes pelos utilizadores
	Qualidade sanitária da água (sem implicação)	
Contribuição para o conforto interior	Conforto higrotérmico	
	Conforto acústico	
	Conforto visual (sem implicação, não considerando revestimento superficial)	
	Conforto olfativo (sem implicação)	

2.4.2 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

A avaliação da segurança contra incêndio efectua-se pela especificação de dois indicadores distintos – a reacção ao fogo dos materiais de construção e a resistência ao fogo dos elementos de construção [45] – com o propósito de garantir a segurança dos ocupantes e (ou) utilizadores do edifício em caso de sinistro, e ainda limitar os danos causados ao próprio edifício e a edificações adjacentes.

A reacção ao fogo caracteriza-se pelo comportamento de um material em termos do seu contributo para a origem e desenvolvimento de um incêndio. No caso da resistência ao fogo, a sua classificação depende da manutenção das funções que um elemento construtivo deve desempenhar em caso da deflagração de um incêndio.

A qualificação dos materiais de construção na vertente reacção ao fogo, nomeadamente de materiais de revestimento de parede, tecto e pavimento, é efectuada em laboratório de acordo com processos de ensaio padronizados, sendo expressa numa de cinco classes:

- M0 – Materiais não combustíveis;
- M1 – Materiais não inflamáveis;
- M2 – Materiais dificilmente inflamáveis;
- M3 – Materiais moderadamente inflamáveis;
- M4 – Materiais facilmente inflamáveis.

Existe actualmente um sistema europeu de classes de reacção ao fogo, denominadas de “Euroclasses”, que integra sete classes (A1, A2, B, C, D, E, F) introduzindo inovações nomeadamente em termos de quantificação da produção de fumos e da queda de gotas ou de partículas inflamadas, não sendo todavia possível estabelecer uma equivalência directa entre esta classificação e a utilizada em Portugal. Existem ainda alguns produtos cujo comportamento ao fogo é profundamente conhecido, existindo a possibilidade de lhes atribuir uma “classificação sem ensaios” (ex. ladrilhos cerâmicos) [46].

Consoante o local de aplicação do material construtivo, a regulamentação nacional vigente impõe para o caso de edifícios de habitação [45] uma classe mínima de reacção ao fogo que deverá ser garantida pelo material especificado, não existindo porém qualquer tipo de exigência para o interior dos edifícios residenciais, onde se procede à aplicação dos sistemas em estudo. Ainda assim importa referir que para as placas de gesso cartonado a sua classe de reacção ao fogo deverá ser, de acordo com [47], no mínimo M1 (não inflamável). Existem ainda placas com características especiais que potenciam uma classe de reacção ao fogo M0 (incombustível), adequadas a utilizações menos correntes.

Quanto à avaliação da resistência ao fogo dos elementos de construção, esta é caracterizada pelo intervalo de tempo durante o qual a sua estabilidade não apresenta nem degradação nem deformações incompatíveis com a sua função, a sua estanquidade não permite que o elemento seja atravessado pelas chamas ou emita gases devido à elevação da temperatura, e o seu isolamento térmico limite a temperatura na face oposta do elemento.

A consideração destes vários desempenhos conjuntamente com a função do elemento no edifício (suporte, compartimentação, ou ambas) permite classificá-lo como “Estável ao Fogo” (exigência de estabilidade somente para elementos com funções de suporte, sendo que as demais classificações incluem sempre esta exigência para elementos com ambas as funções), “Pára-Chamas” (exigência de estanquidade) ou “Corta-Fogo” (exigência de estanquidade e de isolamento térmico).

Novamente a regulamentação vigente define, para os vários tipos de edifícios, e consoante a função e a localização do elemento, valores mínimos de resistência ao fogo, indicador representado por nove classes, cada uma das quais função do período de tempo para o qual se mantém válida a qualificação atribuída ao elemento (em minutos), definidas pelo seu limite inferior (15, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360).

A resistência ao fogo dos sistemas de isolamento térmico pelo interior dependerá de todos os seus constituintes. O material isolante térmico poderá ser do tipo incombustível (ex. lã mineral) devendo realçar-se que as placas de gesso cartonado encerram no interior do seu núcleo cerca de 20% do seu peso em água. Isto significa que 1 m² de placa de gesso cartonado com uma espessura de 12,5 mm contém cerca de 2,2 litros de água. É por este motivo que sob a acção de temperaturas elevadas (por exemplo no caso de incêndio) este

material se comporta de forma excepcional, exibindo um patamar de vaporização a partir dos 100 °C que lhe permite garantir uma considerável resistência ao fogo (é vulgarmente utilizado por exemplo na protecção de estruturas metálicas).

Note-se porém, que para o caso das paredes exteriores não estruturais as exigências legais máximas em termos de resistência ao fogo (edifícios com altura superior a 28m) apontam para uma classe de resistência ao fogo mínima de CF 90, exigência que determina uma espessura mínima da parede de alvenaria a utilizar, que por exemplo para o caso dos tijolos cerâmicos furados é de somente 15 cm (não considerando qualquer revestimento) e de 11cm com um revestimento de argamassa ou de gesso de 1,5 cm em cada face [67], sendo pois garantida pelas soluções mínimas necessárias devido às solicitações de natureza térmica que o sistema de isolamento térmico introduz (Quadro 2.19).

2.4.3 PROTECÇÃO CONTRA O RUÍDO

A norma europeia que estabelece a metodologia de cálculo para a predição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea em edifícios (aplicável preferencialmente a edifícios de habitação) [48] apresenta no anexo D um método simplificado que permite contabilizar a influência da integração de um sistema de isolamento térmico pelo interior, através de um índice designado por ΔR , ou na versão mais corrente e simplificada, ΔR_w .

O parâmetro ΔR é determinado em laboratório (logo com uma influência desprezável de transmissão sonora indirecta ou marginal) a partir da diferença aritmética entre os índices de redução sonora (R) de um elemento de elevada inércia (tipicamente com uma massa superficial de cerca de $250 \text{ kg/m}^2 \pm 50 \text{ kg/m}^2$) com e sem sistema de isolamento térmico pelo interior aplicado, normalmente para as bandas de terço de oitava entre os 100 e os 3150 Hz (frequências centrais das bandas de terço de oitava), correspondentes ao espectro de frequências de (maior) interesse em edifícios residenciais.

Quanto ao parâmetro ΔR_w o seu valor resulta da diferença entre os índices de redução sonora ponderados R_w do elemento construtivo com e sem sistema de isolamento térmico, não sendo em ambos relevante a influência da transmissão sonora indirecta ou marginal.

O método para o cálculo de ΔR_w proposto na norma europeia para os sistemas em estudo é válido para elementos construtivos de base cujo índice de redução sonora (R_w) se encontre compreendido entre 20 e 60 dB, baseando-se no valor da frequência de ressonância conjunta da parede incluindo o sistema de isolamento térmico (f_0) (Equações 2.10 e 2.11).

A Equação 2.10 é aplicável a sistemas de isolamento térmico pelo interior do tipo directo (ver §3.2), enquanto que a Equação 2.11 se aplica a sistemas do tipo autoportante cuja caixa de ar se encontre preenchida por um material com uma resistividade ao ar não inferior a 5 kPa·s/m². Para valores de R do elemento de base superiores a 60 dB (ou, mais raramente, inferiores a 20 dB) será necessário recorrer a ensaios laboratoriais (Figura 2.9).

$$f_0 = 160 \sqrt{s \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (2.10)$$

Sendo,

f_0 – frequência de ressonância, [Hz];

s – rigidez dinâmica do material isolante térmico, [MN/m³];

m_1 – massa superficial do elemento construtivo de base, [kg/m²];

m_2 – massa superficial do sistema de isolamento térmico interior, [kg/m²].

$$f_0 = 160 \sqrt{\frac{0,111}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (2.11)$$

Sendo:

d – dimensão da caixa de ar, [m];

m_1 – massa superficial do elemento construtivo de base, [kg/m²];

m_2 – massa superficial do sistema de isolamento térmico interior, [kg/m²].

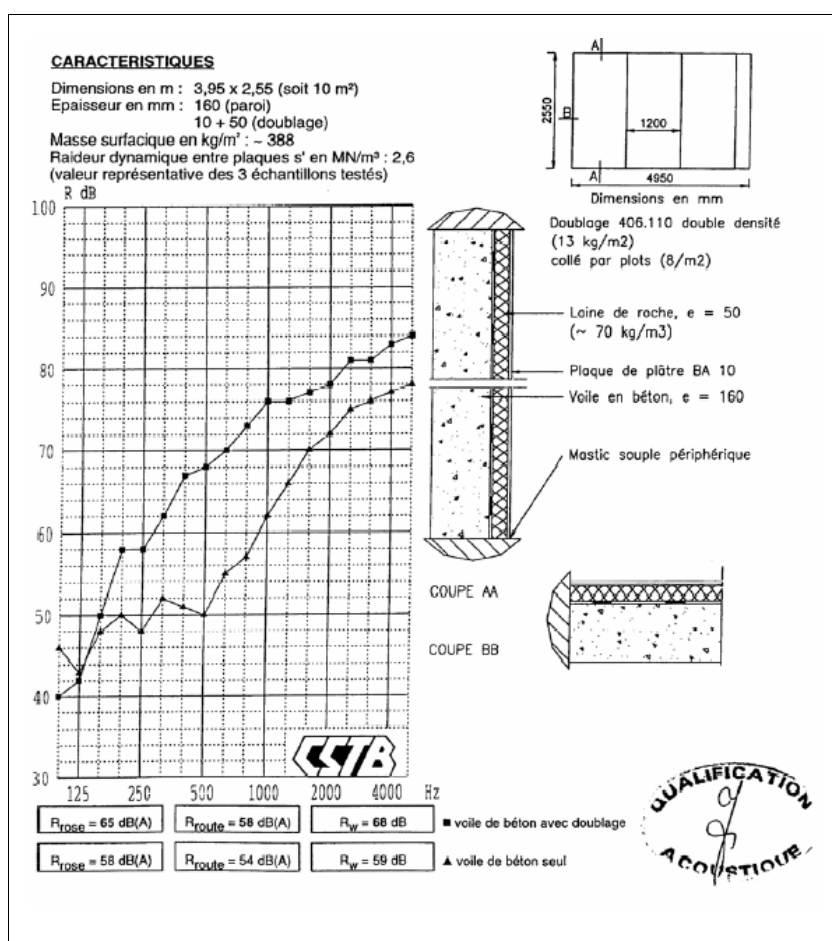


Figura 2.9 – Exemplo de um ensaio laboratorial de redução sonora referente a uma solução comercial de isolamento térmico pelo interior [49]

O valor de ΔR_w é então estimado com base nas expressões definidas no Quadro 2.22.

Quadro 2.22 – Determinação de ΔR_w em função da frequência de ressonância f_0 e do índice R_w do elemento construtivo de base [48]

f_0 [Hz]	≤ 80	100	125	160	200	250	315	400	500	630-1,6k	$> 1,6k$
ΔR_w [dB]	$35 - R_w/2$	$32 - R_w/2$	$30 - R_w/2$	$28 - R_w/2$	-1	-3	-5	-7	-9	-10	-5

Para valores de f_0 inferiores a 200 Hz o valor de ΔR_w é no mínimo igual a zero. Para valores de f_0 iguais ou superiores a 200 Hz, o valor de ΔR_w é sempre negativo, isto é, a utilização de um sistema de isolamento térmico pelo interior nestas condições resulta numa diminuição do índice R_w do elemento construtivo de base até a um máximo de 10 dB.

Se a título de exemplo considerarmos uma solução de parede exterior em alvenaria de tijolo furado com uma espessura de 15 cm, rebocada em ambas as faces com 2 cm, a que corresponde um índice de redução sonora ponderado R_w de aproximadamente 46 dB [23], a aplicação de um sistema de isolamento térmico pelo interior conduziria, teoricamente, aos resultados constantes do Quadro 2.23.

Quadro 2.23 – Índice ΔR_w de um sistema de isolamento térmico pelo interior aplicado a uma parede de alvenaria de tijolo furado com 15 cm de espessura rebocada em ambas as faces com 2 cm [48]

f_0 [Hz]	≤ 80	100	125	160	200	250	315	400	500	630-1,6k	$> 1,6k$
ΔR_w [dB]	12	9	7	5	-1	-3	-5	-7	-9	-10	-5

Naturalmente que para sistemas com um valor de f_0 substancialmente inferior a 80 Hz, conforme a rigidez dinâmica do material isolante térmico, a dimensão da caixa de ar, a massa superficial do sistema, e (ou) a integração de materiais específicos para incremento do isolamento acústico (ex. membranas betuminosas de elevada densidade entre placas de gesso cartonado), o valor de ΔR_w será superior ao estimado pelas expressões apresentadas no Quadro 2.22, devendo nesse caso ser solicitado um boletim de ensaio laboratorial.

À necessidade da compatibilização entre a introdução de um sistema de isolamento térmico pelo interior e o desempenho acústico do edifício, Meisser [50] dedica um capítulo do seu manual relativo a aplicações práticas de acústica de edifícios, confirmando através de numerosos ensaios “in situ” que a integração deste tipo de sistemas influencia não só o isolamento a ruídos provenientes do exterior mas também o isolamento entre espaços interiores, visto reduzir a transmissão sonora por via marginal.

De modo a contabilizar a referida influência, a já mencionada norma de cálculo para a predição do isolamento sonoro a ruídos de condução aérea [48] permite integrar o valor de ΔR_w nos valores do índice de redução sonora ponderado R_w dos 12 caminhos marginais que concorrem para a transmissão sonora entre dois espaços interiores, nomeadamente naqueles em que a introdução do sistema de isolamento térmico pelo interior seja relevante

(no exemplo da Figura 2.10 a agregação de um sistema interior à parede existente, em ambos os pisos, influenciaria os três caminhos marginais: Fd, Df e Ff).

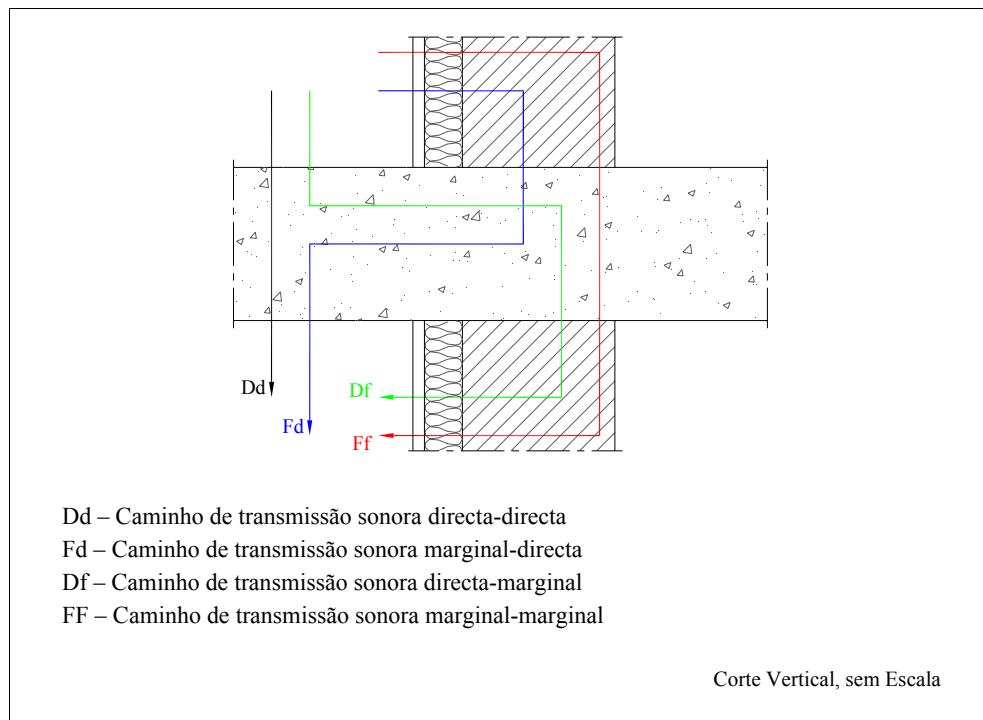


Figura 2.10 – Caminhos de transmissão sonora, para um dos 4 nós que definem a compartimentação entre dois espaços interiores

Embora não seja possível tipificar o ganho de isolamento sonoro decorrente da integração deste tipo de sistema, pois aquele depende sobretudo dos restantes elementos construtivos envolvidos bem como da ligação entre eles, a aplicação desta metodologia de cálculo a envolventes construtivas correntes de edifícios residenciais poderá conduzir a ganhos da ordem dos 2 a 3 dB, o que é bastante significativo atendendo à unidade em questão (dB), referindo-se em [51] um valor de 1 dB por cada elemento marginal isolado.

A importância dos sistemas de isolamento térmico pelo interior no isolamento sonoro em edifícios é confirmada pelo facto das principais marcas comerciais destes sistemas (do tipo directo) terem desenvolvido soluções cujo material isolante térmico é um poliestireno expandido com propriedades modificadas (designadamente menor rigidez dinâmica) de modo a conjugar a sua integração com um aumento do isolamento a ruídos aéreos do elemento construtivo de base [52], o que não se verificava com as soluções tradicionais de sistemas directos integrando aquele isolante térmico (que poderiam implicar inclusive uma redução do valor de R_w da parede de base, isto é, apresentar um valor negativo de ΔR_w).

No entanto, e conforme ilustrado na Figura 2.11, convém referir que o aumento do ganho de isolamento sonoro tem normalmente como contrapartida o incremento do coeficiente de condutibilidade térmica (λ) do material isolante térmico, no caso o poliestireno expandido. No exemplo apresentado (Figura 2.11) os sistemas com melhor desempenho acústico poderão garantir (dependendo do elemento construtivo de base) valores de ΔR_w superiores a 16 dB, mas implicam simultaneamente um aumento significativo do valor de λ do material isolante térmico, que se traduzirá (proporcionalmente) num acréscimo da sua espessura de modo a manter o mesmo desempenho térmico.

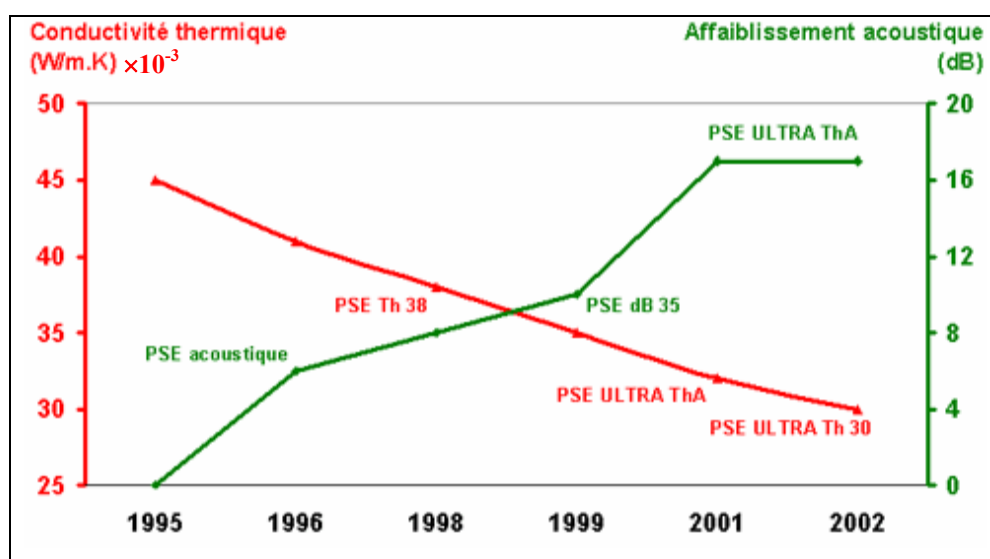


Figura 2.11 – Relação entre o coeficiente de condutibilidade térmica e o ganho de isolamento sonoro de um sistema directo com poliestireno expandido como material isolante térmico [53]

Refira-se ainda que a integração de sistemas de isolamento térmico pelo interior poderá contribuir para a diminuição da transmissão sonora marginal no caso de solicitações por via sólida (ruídos de percussão), pese embora a melhoria de desempenho assegurada por esta via possa ser considerada desprezável em casos correntes.

Numa recente publicação do Fraunhofer Institute of Building Physics [54] é avaliado o incremento do isolamento sonoro a ruídos aéreos em soluções de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS, sendo interessante comparar os valores obtidos com os sistemas de isolamento térmico pelo interior.

Tal como seria expectável, constata-se que o valor de ΔR_w depende sobretudo do índice R da parede de base e da rigidez dinâmica do material isolante térmico. De acordo com os autores a rigidez dinâmica dos isolantes térmicos correntes varia entre 2 e 50 MN/m³, resultando em valores de f_0 habitualmente compreendidos entre 50 e 500 Hz. No Quadro 2.24 apresenta-se um conjunto de resultados obtidos mediante uma avaliação laboratorial, para diferentes paredes de base, caracterizadas pela sua espessura (d), massa superficial (m), frequência crítica (f_c) e índice de redução sonora ponderado (R_w), e para sistemas ETICS caracterizados pela espessura do material isolante térmico (d), pela natureza do material isolante térmico e pela massa superficial do sistema (m).

Quadro 2.24 – Índice ΔR_w para sistemas de isolamento térmico pelo exterior [54]

Caracterização da parede de base				Caracterização do sistema ETICS			f_r [Hz]	ΔR_w [dB]
d [mm]	m [kg/m ²]	f_c [Hz]	R_w [dB]	Tipo Isolante	d [mm]	m [kg/m ²]		
115	215	255	46	EPS	200	32	80	19
240	460	125	55	EPS	200	31	80	13
175	360	175	52	LM	80	8	125	0
300	240	105	43	LM	80	8	125	14

Os próprios autores ressaltam que estes valores deverão ser interpretados com bastante cuidado atendendo à escassez de dados existentes, sendo especialmente enfatizada a variação do desempenho do sistema com o tipo de parede de base e com a relação entre as frequências crítica e de ressonância. Esperam-se por mais desenvolvimentos científicos nesta área no sentido de se poderem obter conclusões mais robustas.

Impõe-se de todo o modo salientar que a principal desvantagem do isolamento térmico exterior neste domínio prende-se com a sua inocuidade em termos da influência no isolamento sonoro entre espaços interiores. De facto a sua introdução apenas beneficiará o isolamento a ruídos aéreos provenientes do exterior o que, atendendo a que o isolamento sonoro da envolvente exterior é normalmente condicionado pelos vãos envidraçados, caixas de estore, e (ou) entradas de ar, limita praticamente o seu efeito a empenas.

2.4.4 RESISTÊNCIA MECÂNICA E ESTABILIDADE

Os sistemas de isolamento térmico pelo interior não possuem qualquer função estrutural, sendo a principal exigência neste domínio a capacidade de resistir aos movimentos da estrutura do edifício sem desenvolver fissurações. Para tal recomenda-se a utilização de bandas resilientes no contacto do sistema com o tecto e o pavimento, conforme explanado no capítulo seguinte deste trabalho.

Ainda a este nível importa garantir a resistência da solução do revestimento face a choques de pessoas e (ou) objectos. Os respectivos documentos de referência deverão especificar a sua influência na resistência os choques da envolvente vertical, sejam estes resultantes de uma ocupação corrente (ex. choque de uma pessoa contra o elemento construtivo) ou de choques excepcionais (ex. peças de mobiliário). A avaliação de desempenho efectua-se normalmente através de um ensaio que consiste basicamente num impacto pendular cuja energia de choque é definida pela altura de queda de um corpo de referência, sendo o efeito avaliado, no caso de placas de gesso cartonado, pelo diâmetro da cavidade resultante [63].

2.4.5 SEGURANÇA NA UTILIZAÇÃO

A influência da utilização de sistemas de isolamento térmico pelo interior é reduzida neste domínio, não se conhecendo qualquer tipo de insegurança no contacto com a superfície interior da parede (exs. queimaduras, electrocussão).

Importa ressaltar a necessidade de serem consultados os fornecedores das soluções construtivas relativamente à suspensão de objectos no elemento de revestimento do sistema, normalmente placas de gesso cartonado.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE TECNOLÓGICA DOS SISTEMAS EXISTENTES

3.1 INTRODUÇÃO

A execução de um sistema de isolamento térmico pelo interior pressupõe a existência de um elemento construtivo de base que, no caso deste estudo, corresponderá a uma parede exterior (poderá ser por exemplo uma laje no caso da execução de um tecto falso interior ao nível da cobertura). Os materiais comumente utilizados neste tipo de elemento são o tijolo cerâmico de barro vermelho (com alguma penetração de alguns tipos de tijolos distintos provenientes de países europeus, sobretudo de Espanha), os blocos de betão normal, os blocos de betão de agregados leves e os blocos de betão celular autoclavado [8].

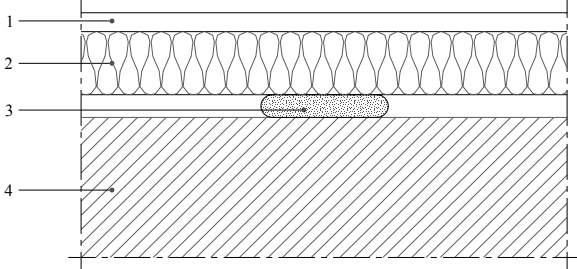
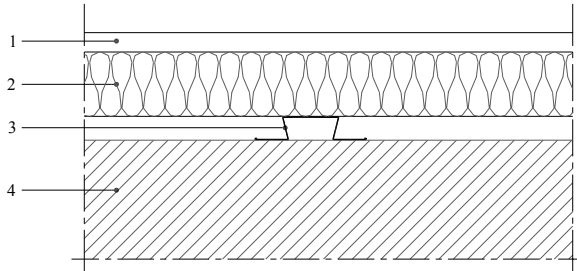
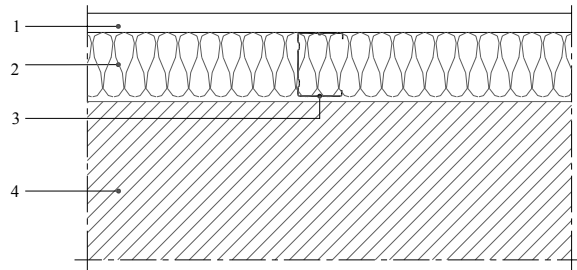
Os diferentes sistemas presentes no mercado europeu da construção de edifícios (cujas principais referências comerciais são listadas, por exemplo, em [55]) são constituídos invariavelmente por um material com características de isolamento térmico e por um elemento interior destinado a conferir resistência mecânica e a permitir a aplicação de revestimentos superficiais diversos tais como reboco, pintura, papel de parede (entre outros), neste trabalho designado por elemento de revestimento.

Dada a proliferação de soluções comerciais utilizando como elemento de revestimento as placas de gesso cartonado, descrevem-se sucintamente as suas principais características no âmbito da sua integração em sistemas de isolamento térmico pelo interior, não se efectuando naturalmente uma análise pormenorizada do seu processo tecnológico, já aliás antes desenvolvida detalhadamente num estudo específico [56].

3.2 CLASSIFICAÇÃO GENÉRICA

A classificação dos sistemas de isolamento térmico pelo interior poderá efectuar-se de acordo com a função do elemento construtivo de base [47] [57] (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Classificação dos sistemas de isolamento térmico pelo interior [47] [57]

Directo	<p>Sistema à base de um complexo pré-fabricado integrando um material isolante térmico de espessura variável colado (em fábrica) a uma placa rígida, normalmente de gesso cartonado. A sua aplicação efectua-se habitualmente por colagem pontual.</p> 
Semi-directo	<p>A definição convencional deste tipo de sistema consiste numa estrutura com perfis do tipo ómega fixados à parede de base, à qual por sua vez são fixados complexos similares aos utilizados nos sistemas directos, tal como ilustrado na figura abaixo apresentada.</p> <p>Sob um ponto de vista teórico, trata-se de uma solução com uma estrutura de suporte (qualquer) directamente fixada ao elemento de base, com material isolante térmico incluído na caixa de ar, sendo o elemento de revestimento fixado à estrutura de suporte.</p> 
Autoportante	<p>Sistema constituído por uma estrutura modulada integrando calhas horizontais metálicas fixadas mecanicamente às lajes de tecto e pavimento, e montantes verticais metálicos encaixados naquelas, aos quais são aparafusados os elementos de revestimento, sendo o espaço de ar existente entre a parede de base e a elemento de revestimento preenchido total ou parcialmente por um material isolante térmico. A designação de autoportante deverá desejavelmente implicar a ausência de apoios pontuais à parede de base.</p> 
Legenda	<p>1 – Elemento de revestimento 2 – Material isolante térmico 3 – Elemento de colagem/fixação 4 – Parede de base</p> <p style="text-align: right;">Corte Horizontal, sem Escala</p>

Esclareça-se que alguma da bibliografia da especialidade inclui no universo dos sistemas de isolamento térmico pelo interior a duplicação do pano de parede exterior integrando material isolante térmico na caixa de ar, bem como a projecção de rebocos sobre materiais isolantes térmicos, soluções não consideradas neste trabalho que se cinge aos sistemas à base de componentes leves pré-fabricados, em geral mais comuns.

3.3 MODO DE CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS

A análise desenvolvida neste capítulo possui um cariz essencialmente tecnológico tendo como referência a vasta quantidade de informação existente sobre este tipo de sistemas, e procurando, através da sua apreciação e sistematização, satisfazer os seguintes objectivos:

- Definição da documentação técnica necessária para uma completa caracterização e aplicação adequada dos sistemas;
- Descrição técnica dos principais componentes dos sistemas (tipo de fixação, material isolante térmico e elemento de revestimento);
- Avaliação da influência do elemento construtivo de suporte;
- Descrição tecnológica sucinta da aplicação dos sistemas;
- Limitações à utilização dos diferentes sistemas.

Refira-se que não se abordam neste capítulo os aspectos referentes ao acabamento dos sistemas de isolamento térmico descritos, tipicamente relacionados com o tratamento de juntas com massa e fita de papel especiais no caso corrente das placas de gesso cartonado serem empregues como elemento de revestimento, visto serem idênticos nos três tipos de sistema e a sua importância ser reduzida para os objectivos do trabalho.

3.4 SISTEMA DIRECTO

Um sistema do tipo directo será necessariamente pré-fabricado, recomendando-se que dado tratar-se de uma tecnologia não tradicional, seja dotado de um documento de referência que ratifique a adequação da sua aplicação para uma dada finalidade, definindo as suas principais propriedades e as respectivas condições técnicas de execução, tal como um Documento de Homologação (LNEC) [58] ou equivalente internacional (ex. Avis Technique [59]). Esta observação é válida igualmente para os demais tipos de sistema.

3.4.1 MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO

Este tipo de sistema é extremamente diversificado no que respeita ao tipo de material isolante térmico que o integra, designadamente quanto à natureza das suas matérias-primas [55], tal como se pode observar no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Exemplos de materiais isolantes térmicos em sistemas do tipo directo [55]

Natureza Matéria-Prima	Material Isolante Térmico
Mineral	Lã de Rocha
	Lã de Vidro
Vegetal	Aglomerado de fibras de madeira
Sintética	Poliestireno expandido moldado
	Poliestireno expandido extrudido
	Poliuretano

A título de exemplo listam-se no Quadro 3.3 algumas das soluções disponibilizadas por uma das principais marcas comerciais [60], utilizando como elemento de revestimento uma placa de gesso cartonado do tipo BA/STD (ver §3.4.2 para a definição da nomenclatura proposta para as placas de gesso cartonado) com 9,5 mm de espessura.

Quadro 3.3 – Sistemas do tipo directo constantes do catálogo de uma marca comercial [60]

Isolante Térmico	Espessura [mm]	Comprimento [mm]	Largura [mm]	λ [W/(m²·°C)]	π ⁱ⁾ [g/(m²·h·mmHg)]
Poliestireno Expandido	30/40/50/70	2500/2600/2800	1200	0,037	300×10^{-5}
Lã de Rocha	40/50/60/70	2500/2600/2800	1200	0,033	7500×10^{-5}
Poliuretano	50/70/90	2500/2600	1200	0,020	200×10^{-5}
Poliestireno Extrudido	40/50/60/70	2500/2600	1200	0,027	70×10^{-5}

i) Valores retirados de [21] dado não serem apresentados no catálogo técnico do fabricante.

3.4.2 ELEMENTO DE REVESTIMENTO

Neste tipo de sistema (e tal como aliás acontece com os sistemas do tipo semi-directo e autoportante), são correntemente empregues placas de gesso cartonado como elemento de revestimento, que posteriormente podem receber acabamentos diversos. Trata-se de um elemento pré-fabricado constituído por uma alma em gesso de origem natural (sulfato de cálcio bihidratado – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) entre duas lâminas de cartão multi-folha. Quer no gesso quer no cartão podem ser adicionados componentes que potenciam o melhoramento de algumas das características do material (tal como é descrito em §3.4.2.4).

As exigências de desempenho a que devem obedecer as placas de gesso cartonado estão definidas em diversos documentos normativos de países com maior tradição construtiva com este elemento, dos quais se salientam os referentes à Espanha e França [61] [62] [63] (visto serem originárias destes dois países as marcas comerciais com maior implantação em Portugal). Uma vez que as placas de gesso cartonado são igualmente o elemento de revestimento corrente nos sistemas semi-directo e autoportante, a generalidade dos pontos a seguir focados deverão ser igualmente considerados nos dois subcapítulos seguintes.

3.4.2.1 ASPECTO

Quanto ao aspecto é determinante o acabamento desejado ao nível do tratamento de juntas a conferir ao sistema em obra, o qual condicionará o tipo de bordo longitudinal da placa. Entre os habitualmente utilizados destacam-se como exemplos o bordo afinado (BA, para paramentos totalmente lisos e contínuos sem juntas aparentes) e o bordo quadrado (BC, para paramentos com juntas aparentes à vista).

3.4.2.2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

O comprimento das placas (correspondente à dimensão paralela aos bordos revestidos, isto é, longitudinal) varia consoante o fabricante e solução, recomendando-se valores nominais compreendidos entre 2000 e 3600 mm (com variações de 100 mm) [47].

A largura apresenta tipicamente valores nominais de 600, 900 e 1200 mm, existindo igualmente no mercado valores de 625 e 1250 mm [47].

Quanto à espessura os valores típicos de mercado são de 9,5, 12,5 e 15 mm (únicos referidos em [65]), existindo no entanto outras espessuras disponíveis: 6; 6,5; 18; 19; 20; 23 e 25 mm [47]. Ainda de acordo com [47] não são admissíveis valores inferiores a 6 mm.

3.4.2.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Sintetizam-se no Quadro 3.4 as principais propriedades físicas a considerar nas placas de gesso cartonado [47] [61] [62] [63].

Atendendo à extensão da informação existente a este nível (sobretudo quanto ao tipo de ensaio laboratorial e à análise de resultados) alguns dos itens apresentados não são quantificados por não possuírem um interesse particular para os objectivos do trabalho.

Quadro 3.4 – Principais características físicas das placas de gesso cartonado

Característica	Unidade	Observações
Massa Volúmica	[Kg/m ³]	Útil por ex. para a quantificação da inércia térmica interior, podendo para o efeito considerar-se um valor médio de 820 kg/m ³ .
Condutibilidade Térmica	[W/(m·°C)]	Coefficiente de condutibilidade térmica igual a 0,18 W/(m·°C).
Deformação sobre Carga	[mm]	Flecha máxima e residual para uma determinada carga, variável consoante o sentido (longitudinal ou transversal).
Resistência à Ruptura em Flexão	[N]	Carga média de rotura à flexão das placas, variável consoante o sentido (longitudinal ou transversal).
Dureza Superficial	[mm]	Diâmetro da cavidade formada pelo impacto normalizado de um objecto (2,5 J) que será inferior a 20 mm (15 mm para placas de elevada dureza).
Estabilidade Dimensional	[m/(m·°C)]	Coefficiente de dilatação linear da ordem dos 15×10^{-6} m/(m·°C), sendo somente sensíveis a variações de humidade do ar em fase de vapor a 200 °C e com uma humidade relativa compreendida entre 15 e 90 %.
Curvatura	[mm]	Máximo raio de curvatura permitido por uma placa para uma dada espessura.

3.4.2.4 CARACTERÍSTICAS DE UTILIZAÇÃO

Em determinados compartimentos poderá ser necessário recorrer a placas com algumas características melhoradas, assegurando um nível de desempenho compatível com o tipo de actividade a desenvolver (ex. espaço nos pisos inferiores de um edifício misto de habitação e serviços com ocupação do tipo educacional, para o qual é recomendável a utilização de placas com uma elevada dureza superficial [47]).

Dentre os vários tipos de placas existentes, e com o intuito de uniformizar a sua designação comercial, as principais marcas espanholas adoptaram um sistema comum de nomenclatura [47], sendo destacadas no Quadro 3.5 as que são habitualmente encontradas em sistemas do tipo directo, podendo qualquer uma delas ser em princípio integrada em sistemas do tipo semi-directo (não convencional) e autoportante.

Quadro 3.5 – Denominação comercial dos principais tipos de placas de gesso cartonado [47]

Ref. ^a	Descrição
STD	Placa standard utilizada na generalidade das situações. É normalmente identificada pela cor do seu cartão, branco na face a revestir e marfim na face oposta.
H	Placa com tratamento hidrófugo adicional nas suas lâminas de cartão, de forma a permitir a obtenção de características melhoradas de absorção de água ⁱ⁾ , normalmente apresentando uma cor verde em ambas as faces.
F	Placa que incorpora fibras de vidro e (ou) outros componentes na alma de gesso de modo a incrementar a sua resistência ao fogo.
M0	Placa concebida de modo a garantir a incombustibilidade, isto é, uma classe de reacção ao fogo M0.
AD	Placa cuja principal característica é a garantia de uma dureza superficial mais elevada.
BV	Placa que incorpora na sua face interior uma barreira pára-vapor, aumentando assim a sua resistência à difusão de vapor.
RX	Placa que incorpora na sua face interior uma placa de chumbo para protecção radiológica.
PVP	Placa que incorpora na sua face exterior uma lâmina de PVC decorativa.

i) Absorção de água superficial inferior a 160 g/m²; absorção total máxima de água inferior a 5% do peso da placa seca.

Referências destacadas – Tipo de placas habitualmente encontradas em sistemas do tipo directo.

3.4.3 TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO

A superfície do elemento construtivo a revestir (parede) deverá estar isenta de poeiras e de produtos oleosos, bem como desprovida de humidades. No Verão, caso o suporte esteja demasiado seco, é conveniente proceder a uma ligeira humidificação [25]. A aplicação do produto de colagem pode ser efectuada directamente sobre o suporte (procedimento mais corrente [47]) ou no tardo do complexo (sobre o material isolante térmico).

Em situações de reabilitação recomenda-se uma avaliação cuidada das condições de aderência da parede de suporte [25], devendo proceder-se ao tratamento das fissuras mais significativas e à decapagem do elemento de revestimento e posterior lavagem, em toda a superfície caso o produto de colagem seja aplicado no complexo ou, no caso da aplicação do produto directamente na parede, em bandas predefinidas. Em casos extremos deverá recorrer-se complementarmente à fixação mecânica do complexo ao suporte.

De acordo com [25] o tipo de colagem (por pontos, por bandas, ou inclusive através de uma combinação destes, recomendada por exemplo para alguns sistemas com lã mineral como material isolante térmico) e a quantidade de produto por placa, variam de acordo com a natureza do material isolante térmico, sendo indispensável a consulta do documento de referência (ainda em [25] refere-se como regra geral para materiais isolantes térmicos à base de lã mineral que a superfície com cola corresponda a cerca de 15% da superfície do complexo, uniformemente distribuída).

As irregularidades máximas do suporte de modo a viabilizar a aplicação do produto de colagem variam de acordo com o tipo de produto a utilizar, que para os casos correntes (produtos à base de gesso aditivado) são da ordem dos 15 mm [25]. Caso o valor de tolerância seja distinto deverá ser indicado no respectivo documento de referência.

Já em [47] a classificação quanto às irregularidades máximas admissíveis é distinta, considerando três situações consoante a sua dimensão seja inferior a 10 mm, superior a 20 mm, ou esteja compreendida entre os dois valores (Figura 3.1).

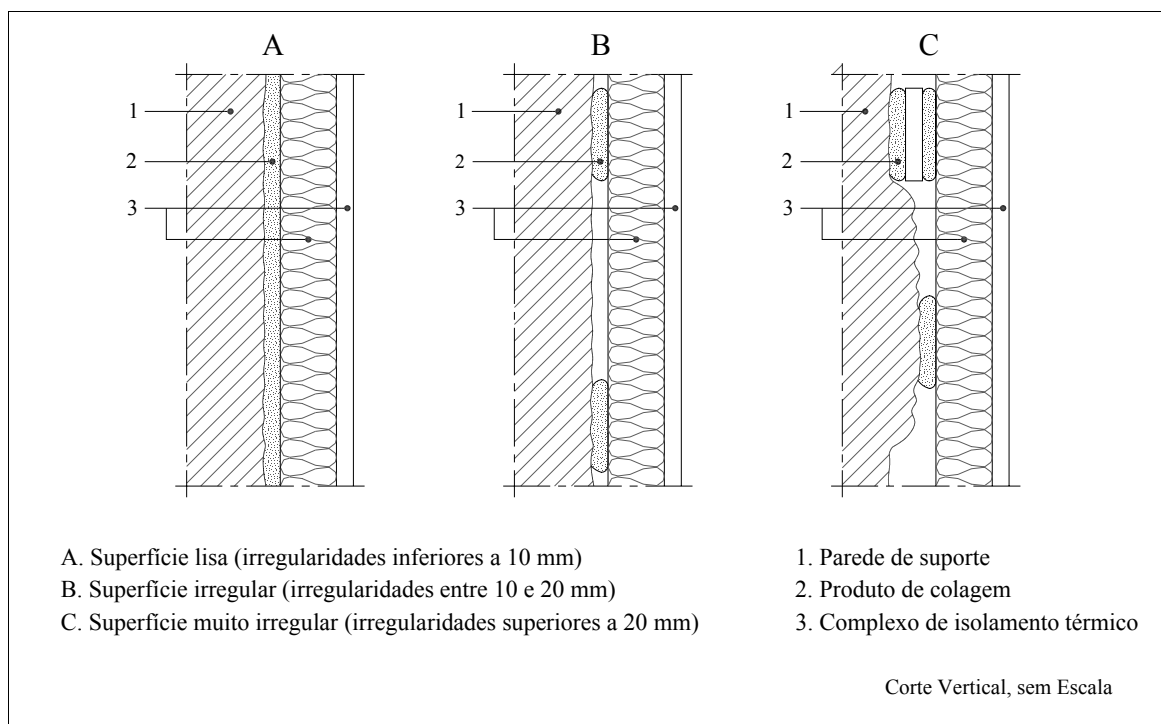


Figura 3.1 – Classificação da superfície do elemento construtivo de suporte [47]

Caso as irregularidades máximas não ultrapassem 10 mm, poderá aplicar-se o sistema indistintamente por montículos de massa ou por bandas aplicadas no sentido longitudinal. No primeiro caso sugere-se a utilização de uma malha de pontos de colagem com espaçamento de 40 cm, e no segundo de bandas com uma largura mínima de 10 cm e separadas entre si no máximo de 40 cm (Figuras 3.2 e 3.3) [47]. Os montículos terão um diâmetro variável entre 18 e 20 cm, e uma espessura inferior a 10 mm no caso de uma superfície lisa, e de 20 mm nos demais casos.

Note-se a utilização de pontos de colagem intermédios na zona do tecto e de uma forma similar ao nível do pavimento, bem como de uma banda contínua de produto no caso de colagem por bandas, de modo a obter planos bem alinhados que permitam uma correcta colocação de rodapés e (ou) de tectos falsos (ou de outros elementos) [47].

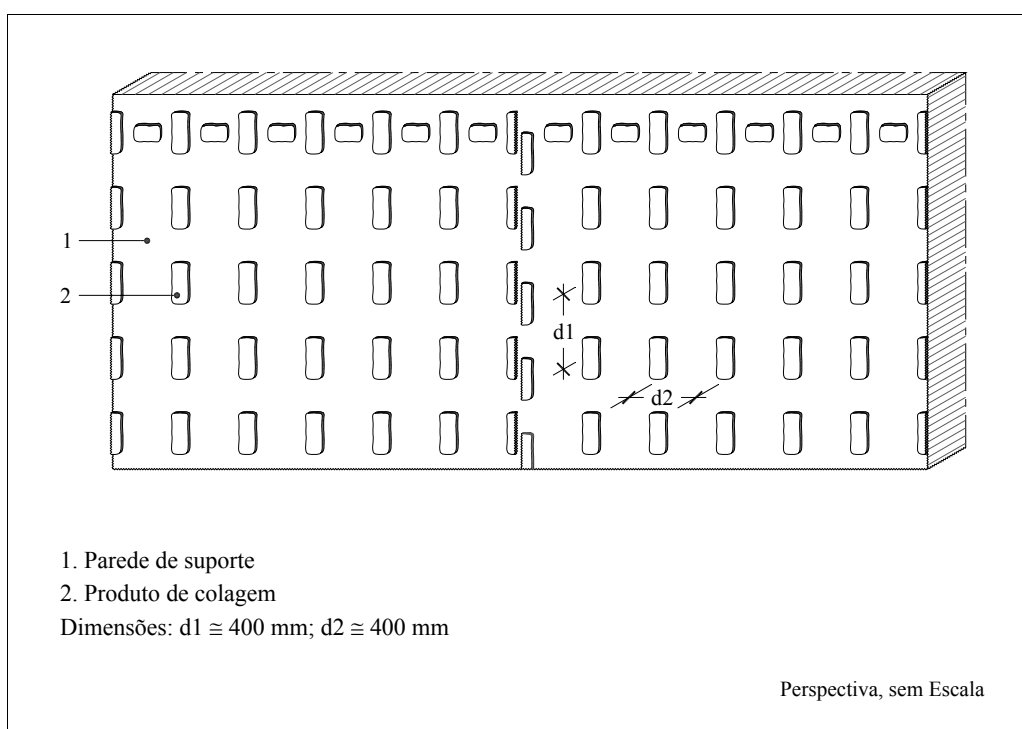


Figura 3.2 – Aplicação do produto de colagem sob a forma de montículos [47]

Quando está em causa uma superfície irregular, a aplicação apenas poderá ser efectuada (excepto sob indicação de um documento de referência) através de pontos de colagem com uma malha similar à definida anteriormente [47]. No caso de superfícies muito irregulares, poderão utilizar-se tiras de placas de gesso cartonado coladas sobre a base e sobre as quais serão colados os complexos em análise, de acordo com as regras referidas anteriormente, com um limite máximo de 60 mm para as irregularidades [47].

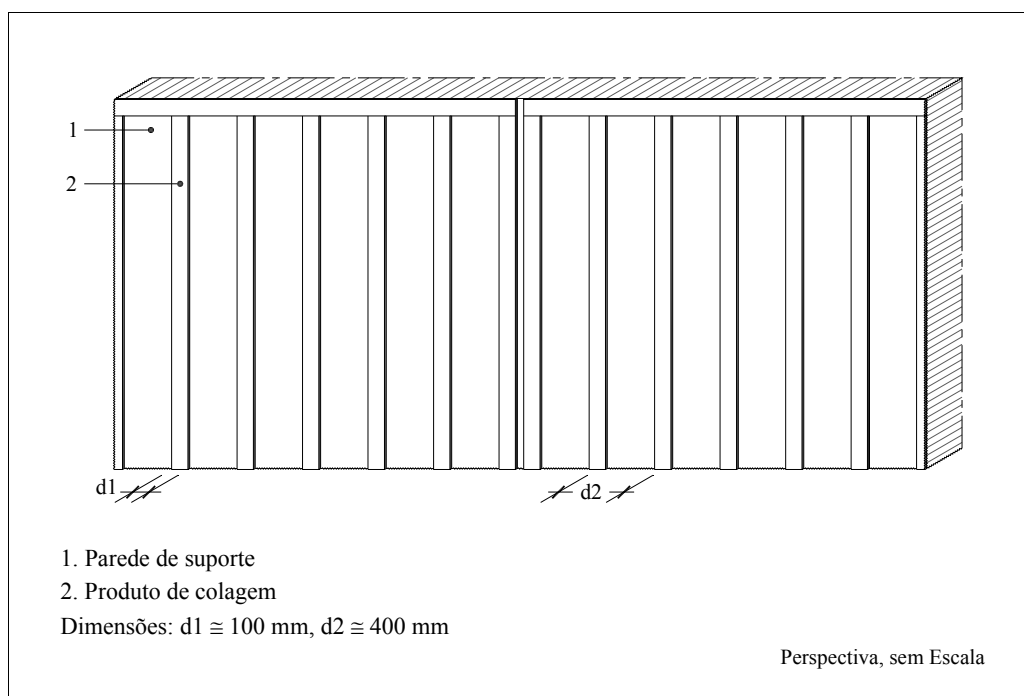


Figura 3.3 – Aplicação do produto de colagem sob a forma de bandas [47]

O complexo é aplicado pressionando-o contra o produto de colagem (no caso corrente do produto de colagem ser aplicado no elemento de suporte) e no sentido do tecto. Somente se deverá proceder à aplicação do produto de colagem correspondente ao segundo painel assim que se encontre concluída a colocação do primeiro.

O bordo inferior do complexo deverá ficar afastado entre 10 a 15 mm da cota de revestimento final do pavimento de modo a evitar a transferência de humidade, podendo para o efeito serem empregues calços (provisórios) que normalmente se realizam com excedentes do complexo aplicado. Estes serão retirados após finalizada a aplicação num dado troço de parede, nunca antes de 48 horas no caso do material isolante térmico ser um poliestireno expandido ou extrudido e de 72 horas no caso de uma lã mineral [47].

Atente-se que o material isolante térmico é igualmente interrompido ao nível da ligação com o pavimento, levando à ocorrência de uma ponte térmica. Deverá assim ser utilizado um sistema com uma junta térmica integrada, isto é, com a placa de gesso cartonado cortada cerca de 2 cm acima do isolante térmico [64]. Uma hipótese alternativa consiste na utilização de uma banda estanque (com características de isolamento térmico) que evite o contacto directo do complexo com o pavimento (Figura 3.4).

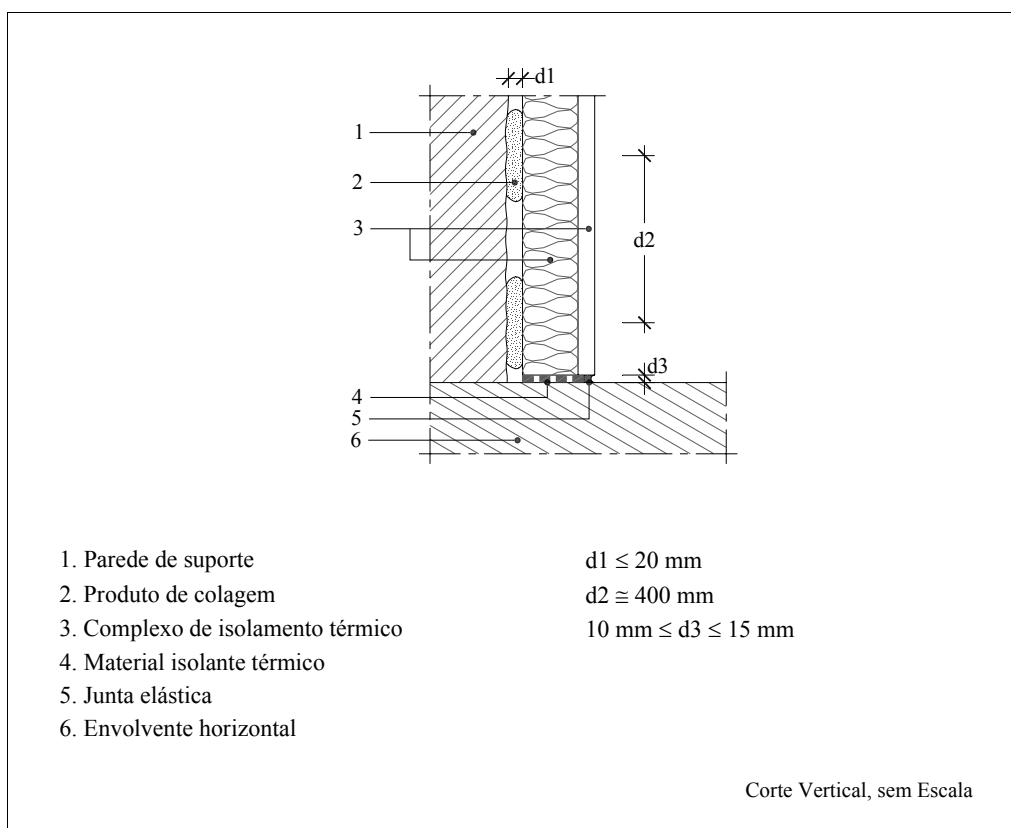


Figura 3.4 – Pormenor de ligação de um sistema do tipo directo com um pavimento em zona corrente (não húmida)

A altura máxima para a aplicação deste tipo de solução é de 3,00 m no caso do material isolante térmico ser uma lã mineral e de 3,60 m para poliestireno expandido ou extrudido [47], o que será normalmente suficiente para a aplicação em edifícios residenciais. Caso se pretendam atingir alturas superiores será necessário recorrer a uma estrutura de suporte entre os bordos transversais dos painéis. Note-se que neste caso as juntas transversais entre painéis não deverão ser coincidentes na mesma linha horizontal, sendo prudente garantir um desfasamento no mínimo de 40 cm entre juntas [47]. Entre a colocação de dois painéis sobrepostos deverá respeitar-se um intervalo temporal similar ao da retirada dos calços referida anteriormente.

Refira-se ainda que nas zonas de encontro com vãos, designadamente aros de portas e caixilharias de envidraçados, as juntas entre complexos não deverão ser coincidentes com o alinhamento vertical daqueles, prolongando-se para além deles no mínimo em 30 cm [47]. Recomenda-se a consulta do documento de referência do sistema para uma aplicação adequada nestas zonas pontuais.

3.4.4 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DE UTILIZAÇÃO

De acordo com [25] não é recomendável a utilização deste tipo de sistema em locais com um teor de humidade permanentemente próximo da saturação, com projecção de água muito frequente (ex. balneários públicos, lavandarias) ou com temperaturas normalmente superiores a 50 °C (ex. cozinhas com uma grande utilização). Ainda assim aconselha-se a consulta do respectivo documento de referência, já que alguns dos sistemas analisados afixam a possibilidade da sua utilização em locais húmidos [64].

Para além destas situações limite, o sistema apresenta como grande limitação o facto de não permitir optar por um elemento de revestimento distinto dos disponíveis no mercado em projectos/obras correntes (salvaguardando naturalmente o caso de serem desenvolvidas soluções tecnológicas excepcionais para uma determinada aplicação).

Ressalva-se que mesmo no caso de placas de gesso cartonado, e tal como é referido no Quadro 3.5, não é viável a utilização de todos os tipos de placas, estando a escolha obviamente limitada às soluções comerciais pré-fabricadas existentes.

Poderão ainda obstar à utilização desta solução factores como uma deficiente aderência do elemento de suporte, irregularidades superiores aos limites admissíveis ou a necessidade de inclusão de instalações entre a parede de base e o sistema de isolamento térmico pelo interior (apesar de alguns fabricantes considerarem a possibilidade de integrar instalações por corte do material isolante térmico ou de orifícios pré-fabricados, entendemos que esta não poderá ser na prática tomada como uma valência corrente deste tipo de sistema).

3.5 SISTEMA SEMI-DIRECTO

As razões subjacentes à preferência por sistemas do tipo semi-directo derivam sobretudo das limitações apontadas à utilização dos sistemas do tipo directo, nomeadamente da existência de condições de aderência deficientes ao nível da parede de base.

Note-se a propósito que a utilização em sistemas do tipo semi-directo dos complexos pré-fabricados referidos anteriormente (solução convencional) pode revelar-se problemática atendendo a que a acção do seu aparafusamento à estrutura de suporte comprime o material isolante térmico, podendo originar em fase de utilização o aparecimento de fissuras entre as juntas dos painéis e (ou) uma planimetria irregular do paramento. Importa assim advertir para a necessidade do material isolante térmico possuir uma compressibilidade reduzida, recomendando-se que o documento de referência do complexo seleccionado contemple este tipo de utilização.

Assim, e embora a descrição efectuada seguidamente considere esta situação, adverte-se para a possibilidade de utilizar um material isolante térmico independente e (ou) uma estrutura de suporte menos corrente (solução não convencional), com vantagens evidentes como a possibilidade de usar elementos de revestimentos distintos ou a compatibilização entre os desempenhos térmico e acústico, entre outras.

3.5.1 TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO

De uma forma sintética pode estabelecer-se uma divisão do processo de montagem deste tipo de sistema em três etapas básicas:

- Fixação da perfilaria metálica ao elemento de suporte;
- Aparafusamento de um complexo similar ao do sistema directo (ou aplicação de um material isolante térmico independente – solução não convencional);
- Fixação do elemento de revestimento (solução não convencional).

3.5.2 ESTRUTURA DE SUPORTE

A estrutura de suporte (convencional) deste tipo de sistema é constituída por perfis metálicos verticais em forma de Ω (Figura 3.5). Segundo [47] estes perfis são realizados em chapa fina de aço galvanizado incluindo um revestimento de zinco no mínimo do tipo Z275 de modo a conferir protecção face à corrosão.

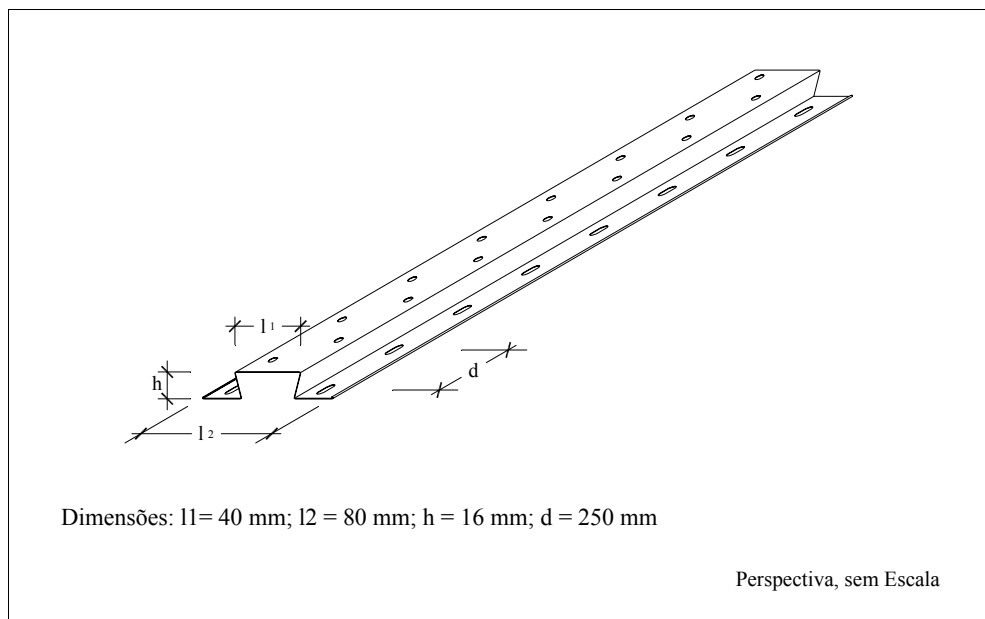


Figura 3.5 – Perspectiva de um perfil metálico de suporte em sistemas do tipo semi-directo [57]

Caso o elemento de suporte apresente irregularidades significativas recomenda-se uma nivelção através de cunhas de madeira ou metálicas (muito limitada).

A fixação dos perfis metálicos à parede de suporte é normalmente efectuada por aparafusamento duplo, isto é, uma fixação em cada uma das abas do perfil de suporte [47].

O espaçamento entre perfis metálicos é normalmente de 300, 400 ou 600 mm, dependendo da espessura e do tipo de solução a utilizar (conforme o documento de referência). Esta modulação não deverá ser interrompida, mesmo caso seja necessária a introdução de perfis intermédios (ex. arranque de uma divisória leve) (Figura 3.6).

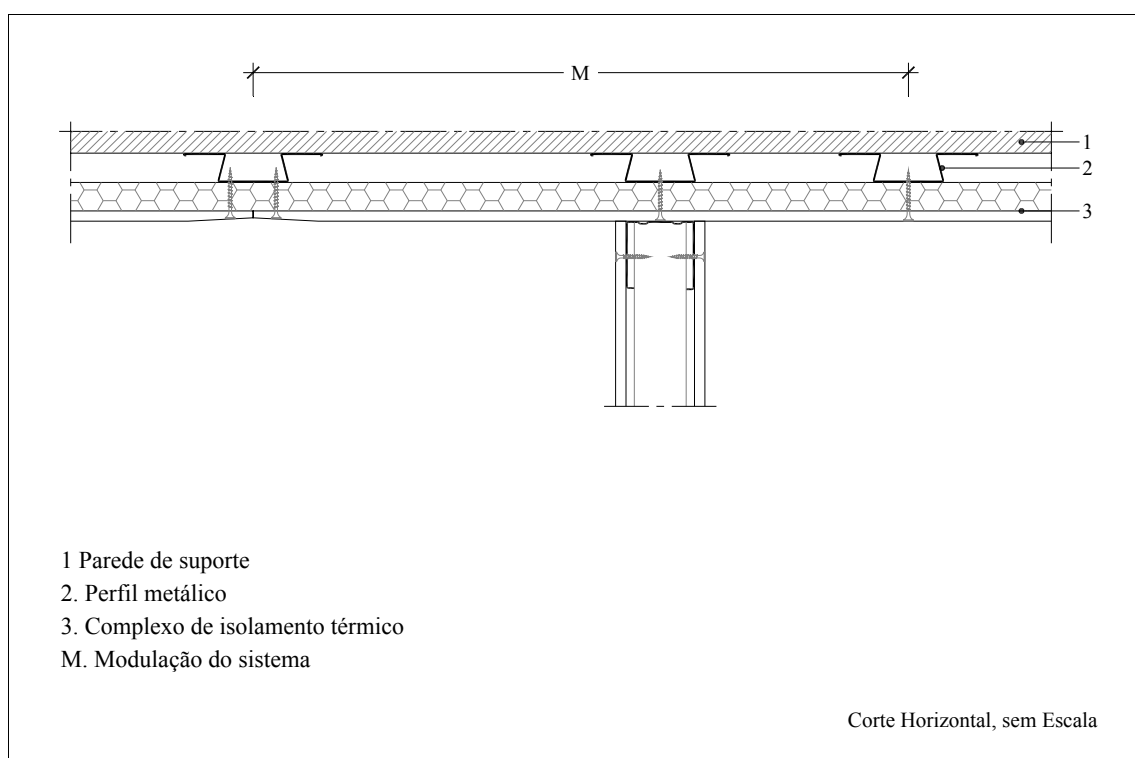


Figura 3.6 – Modulação de sistemas do tipo semi-directo e introdução de perfis de reforço [47]

Tal como o preconizado para os sistemas do tipo directo, nas zonas superior e inferior do sistema (junto ao tecto e ao pavimento) devem ser colocadas, entre perfis de modulação, peças metálicas de 15 a 20 cm de comprimento, ou em alternativa peças contínuas, de modo a posteriormente facilitar e garantir a qualidade da execução de rodapés e (ou) de tectos falsos (ou de outros elementos) (ver Figura 3.7 apresentada no ponto seguinte).

3.5.3 MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO E ELEMENTO DE REVESTIMENTO

A hipótese da inclusão de um material isolante térmico independente do elemento de revestimento apresenta os inconvenientes, para os sistemas de fixação correntes, das pontes térmicas introduzidas, e da limitação da espessura de material isolante térmico a utilizar (em função das dimensões da perfilaria metálica, embora para sistemas de fixação menos correntes, típicos por exemplo em aplicações onde esteja em causa o reforço do isolamento sonoro, esta dificuldade possa ser facilmente ultrapassada).

No caso da aplicação de um complexo pré-fabricado integrando ambos os componentes, após o aparafusamento à estrutura metálica este deverá ficar afastado entre 10 a 15 mm da cota de revestimento final do pavimento de modo a evitar a transferência de humidade, tal como no caso dos sistemas do tipo directo.

O tipo de aparafusamento a utilizar bem como a sua distribuição deverá ser definido no respectivo documento de referência do sistema, apresentando-se na Figura 3.7 um esquema exemplificativo [47].

No caso dos bordos longitudinais entre complexos é referida como uma boa prática construtiva o desfasamento entre os parafusos em ambos os lados da junta (Figura 3.7).

Para as peças metálicas a aplicar junto ao tecto e pavimento deverá ser colocado pelo menos um parafuso (para modulações não superiores a 400 mm), recomendando-se dois parafusos para as modulações de 600 mm (Figura 3.7). No caso da opção por peças contínuas devem ser utilizados espaçamentos similares aos dos perfis [47].

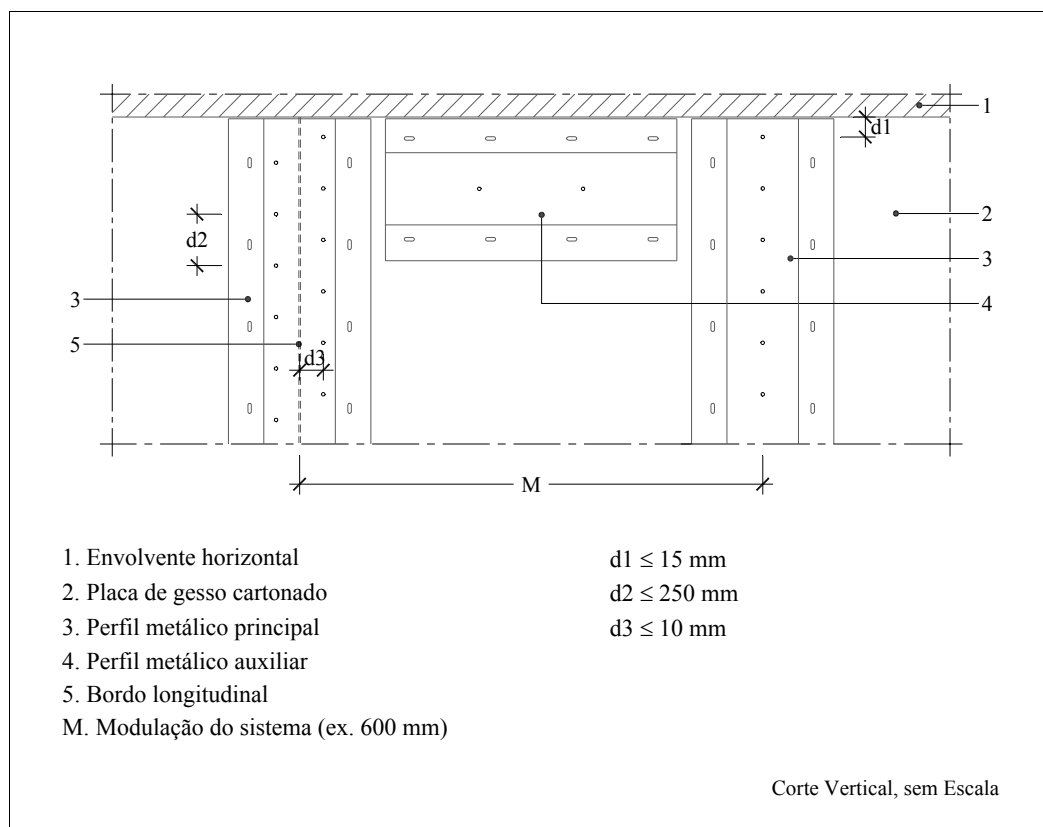


Figura 3.7 – Aparafusamento do sistema aos elementos de suporte [47]

Sempre que se verifique ser necessária a sobreposição de placas na vertical são válidas as recomendações referidas para os sistemas do tipo directo [47].

Em zonas de encontros com vãos não deverá ser interrompida a modulação do sistema, devendo ser acrescentados os perfis necessários de modo a garantir as recomendações dos fabricantes, sendo válidas as recomendações referidas para os sistemas do tipo directo.

3.5.4 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DE UTILIZAÇÃO

Tal como enfatizado em [47] o aparafusamento entre complexos integrando materiais isolantes térmicos e a perfilaria metálica acarreta dificuldades técnicas que deverão ser avaliadas pelos respectivos fabricantes.

A limitação de espessura do material isolante térmico (pela espessura dos perfis da estrutura de suporte) e a introdução de pontes térmicas nas ligações entre a estrutura e a parede de base poderão ser igualmente aspectos negativos, caso se pretenda utilizar um elemento de revestimento independente do material isolante térmico.

É francamente desaconselhável a preferência por este tipo de sistemas (no caso de uma solução convencional) sempre que esteja em causa uma exigência de desempenho acústico ao nível do isolamento a ruídos de condução aérea, visto que estes introduzem pontes fónicas nas ligações ao elemento de suporte.

3.6 SISTEMA AUTOPORTANTE

A preferência por um sistema do tipo autoportante justifica-se quando as limitações atrás elencadas para os seus congêneres colidem com as exigências de desempenho da obra em questão (ex. incremento do isolamento térmico e acústico em suportes de fraca aderência com necessidade da integração de instalações diversas na caixa de ar).

3.6.1 TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO

De uma forma resumida pode estabelecer-se uma divisão do processo de montagem deste tipo de sistema nas seguintes etapas básicas:

- Fixação dos elementos horizontais da estrutura de suporte nas lajes de pavimento (guia inferior) e de tecto (guia superior);
- Encaixe dos elementos verticais da estrutura de suporte (montantes) nas guias inferior e superior;
- Montagem/aplicação do material isolante térmico;
- Fixação do elemento de revestimento.

3.6.2 ESTRUTURA DE SUPORTE

A estrutura de suporte é normalmente constituída por perfis metálicos, sendo os horizontais em forma de U e os verticais em forma de C (Figura 3.8).

A sua distinção em obra é facilitada pelo facto de os montantes possuírem orifícios destinados à passagem de instalações hidráulicas e eléctricas, o que não acontece com as guias. Por outro lado, a superfície dos banzos dos montantes possui um picotado que facilita o aparafusamento dos elementos de revestimento.



Figura 3.8 – Estrutura de suporte em sistemas do tipo autoportante

Segundo [47] os perfis metálicos são realizados em chapa fina de aço galvanizado, com propriedades idênticas aos dos sistemas semi-directos. A largura da secção horizontal dos perfis é variável em função do tipo de solução a implementar, sendo usuais valores comerciais nominais de 20, 30, 36, 48, 70, 90, 100, 125 e 150 mm [47].

Os montantes deverão encaixar nas guias (e não ser fixados mecanicamente) sendo sobre eles aparafusado o elemento de revestimento. Assim, a largura nominal dos montantes deverá ser inferior à das guias, normalmente com uma diferença de 1 mm. A altura dos montantes é bastante variável sendo em princípio viável a sua utilização em edifícios residenciais sem necessidade de emendas.

3.6.2.1 FIXAÇÃO DAS GUIAS

A actividade de fixação das guias reveste-se de uma importância particular já que uma vez efectuada estará determinada a posição final da solução. O procedimento inicia-se com a marcação no pavimento e no tecto da localização das guias e dos pontos de referência de situações pontuais (ex. locais de fixação de cargas pesadas), recomendando-se a utilização dum cordão de marcação que permitirá agilizar esta tarefa (para maior detalhe técnico desta operação sugere-se a consulta de [56]).

Preliminarmente à fixação das guias nas lajes de pavimento e de tecto deverá ser aderido na sua face inferior um material resiliente, visando absorver as deformações estruturais e incrementar o isolamento sonoro a ruídos de condução aérea (de acordo com [58] uma tira de espuma flexível de poliuretano com 4 mm de espessura) (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Pormenor do material resiliente sob a guia de pavimento

A fixação das guias às lajes de tecto e de pavimento será efectuada com parafusos e buchas ou com pistola e pinos de aço (procedimentos mais correntes, sendo aceitáveis outros desde que validados pelo fabricante), devendo garantir-se que as fixações sucessivas se fazem descentradas em relação ao eixo do perfil (Figura 3.10). A distância entre duas fixações sucessivas não deverá exceder 60 cm, garantindo-se ainda que cada peça seja fixa no mínimo em 3 pontos (2 pontos para peças inferiores a 50 cm) [47].



Figura 3.10 – Vista da fixação descentrada das guias

O valor de 60 cm deverá ser reduzido para 40 cm caso os elementos de suporte de fixação não sejam suficientemente rígidos (ex. laje aligeirada com blocos de poliestireno). Para além do espaçamento inferior a 60 cm entre pontos de fixação, a distância entre fixações e o extremo do perfil não poderá exceder 5 cm. Recomenda-se ainda a inexistência de interrupções das guias com uma dimensão superior a 30 cm [47].

Nas zonas de vãos de portas o perfil deverá ser interrompido e, de cada lado do vão, ser colocado verticalmente um troço de perfil, com 0,15 m a 0,20 m de comprimento, com o objectivo de reforçar a ligação do vão/divisória [58].

3.6.2.2 COLOCAÇÃO DOS MONTANTES

A colocação dos montantes varia consoante se tratem de montantes de arranque (perimetrais) ou de montantes intermédios (modulação do sistema). No primeiro caso os montantes deverão fixar-se mecanicamente a um elemento construtivo de suporte (ex. parede interior, pilar, etc.), com um espaçamento inferior a 60 cm (com um número de peças de acordo com as regras já definidas para as guias), assim como às duas guias.

Estes perfis devem ser contínuos do tecto ao pavimento, sendo que em caso de manifesta impossibilidade tecnológica (ex. passagem de instalações) devem ser respeitadas as regras de boa construção ilustradas na Figura 3.11 [47]. Da mesma forma que as guias, os montantes perimetrais devem possuir um material resiliente aderido.

Os montantes intermédios serão encaixados (e não fixados) nas guias com um espaçamento máximo de 60 cm (o valor de 40 cm é também habitualmente utilizado) (Figura 3.12).

Deverão ser colocados montantes suplementares sempre que se preveja uma ligação em T com outra divisória ou no caso de vãos, assim como no tardo de uma placa entre juntas de duas placas. Ressalve-se novamente que a fixação dos montantes às guias deverá ser somente efectuada no referido caso dos montantes perimetrais, no encontro de divisórias e quando adjacentes a portas e janelas.

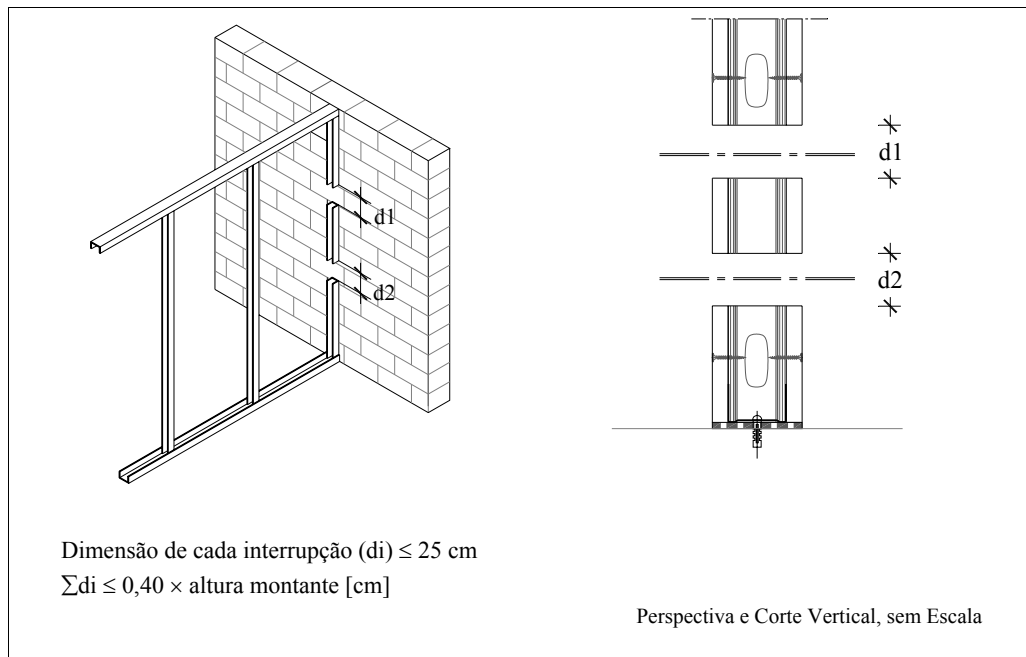


Figura 3.11 – Pormenorização da interrupção de montantes perimetrais [47]

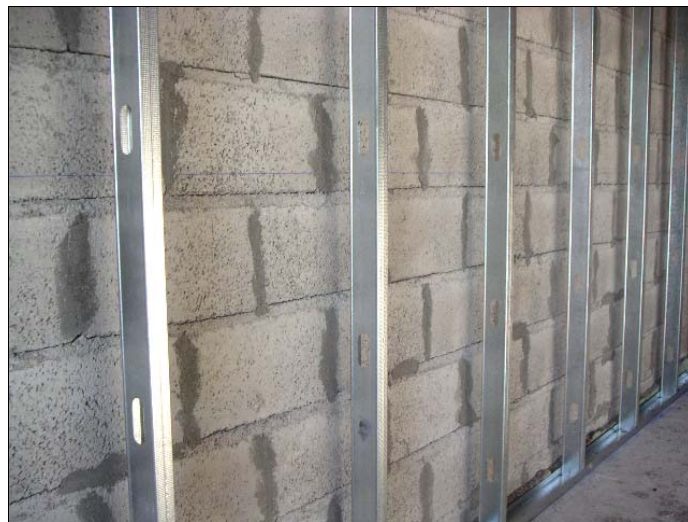


Figura 3.12 – Montantes de modulação do sistema

Os montantes deverão possuir aproximadamente a altura do pé-direito do compartimento com uma folga entre 5 a 10 mm (situada na guia superior). A colocação dos montantes deverá ser efectuada sempre no mesmo sentido, exceptuando os extremos do sistema e ainda eventuais reforços para montagem de portas ou situações afins.

Um aspecto importante prende-se com a eventual necessidade de utilizar montantes duplos (em forma de H), que se justificará sempre que a resistência da estrutura metálica de suporte utilizada não for suficiente para a altura máxima necessária. Atendendo ao carácter esporádico deste situação em edifícios residenciais, entendeu-se não se justificar detalhar neste trabalho os aspectos relacionados com a capacidade estrutural da perfilaria.

3.6.3 MATERIAL ISOLANTE TÉRMICO

Neste tipo de sistema é comum a utilização como material isolante térmico de painéis de lã mineral (lã de rocha ou lã de vidro), embora seja em princípio viável a introdução de qualquer tipo de solução (ex. fibras de celulose (Figura 3.13)). Tecnicamente importa garantir a perfeita continuidade do material isolante térmico, o que para certos tipos de aplicação pode revelar-se problemático, existindo casos em que poderá ser necessário recorrer à fixação mecânica e (ou) colagem do material isolante térmico à parede de base.



Figura 3.13 – Utilização de fibras de celulose como material isolante térmico

Refira-se a propósito que no caso do material isolante térmico ser à base de poliestireno deverá ser evitado o seu contacto com cabos eléctricos dotados de protecção em PVC, pois esta poderá envelhecer prematuramente. Deverá ser ainda ponderada pelo projectista da especialidade a hipótese de sobreaquecimento da instalação no caso desta se encontrar envolvida por material isolante térmico.

3.6.4 ELEMENTO DE REVESTIMENTO

A fixação do elemento de revestimento aos montantes no caso corrente das placas de gesso cartonado, efectua-se por intermédio de parafusos do tipo “placa-metal” [47], cujo comprimento deverá corresponder à espessura da placa acrescida de 10 mm (Figura 3.14), aplicados com um espaçamento máximo de 25 cm, e respeitando uma distância mínima de 10 mm em relação ao bordo longitudinal e de 15 mm em relação ao bordo transversal.



Figura 3.14 – Fixação das placas de gesso cartonado aos montantes

Durante a tarefa de fixação das placas à estrutura de suporte importa garantir que o seu posicionamento seja correcto. Tal como já referido deve evitar-se o contacto directo das placas com o pavimento (de modo a evitar a absorção da humidade que possa existir), pelo que as placas devem possuir uma folga de cerca de 10 a 15 mm relativamente ao valor do pé-direito do compartimento (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Folga no bordo inferior das placas de gesso cartonado

3.6.5 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES DE UTILIZAÇÃO

Considerando os diversos sistemas de isolamento térmico pelo interior não se poderão apontar limitações efectivas à utilização dos sistemas do tipo autoportante.

Será somente de referir neste ponto uma eventual dificuldade na utilização destes sistemas (pelo menos até à sua implantação definitiva na prática construtiva nacional) derivada da necessidade de uma efectiva compatibilização entre as várias especialidades, de modo a otimizar o seu desempenho e rentabilizar as suas principais vantagens, destacando-se os seguintes aspectos (note-se que a generalidade destes aspectos poderão ser igualmente imputáveis aos sistemas do tipo directo e semi-directo):

- Posição de saída das tubagens das diversas instalações e a sua concentração na laje de modo a não inviabilizar a fixação das guias de pavimento;
- Pormenorização adequada quer das fixações, quer das vedações nos pontos de saída em instalações eléctricas e hidráulicas, recorrendo a mástiques apropriados;
- Existência de peças de mobiliário ou outras peças suspensas (ex. autoclismos) que podem obrigar à utilização de sistemas específicos de fixação, no caso de excederem os pesos máximos definidos pelos fabricantes;
- Compatibilização das juntas de dilatação do sistema a utilizar (a definir pelo documento de referência) com as juntas estruturais, para além das juntas de dilatação recomendadas pelo próprio fabricante;
- Limitação das deformações das lajes a 1/700 do vão (máximo de 1 cm) de modo a evitar a fissuração das placas; caso contrário deverão ser previstas disposições construtivas adequadas [58].

3.7 PRINCIPAIS CONDIÇÕES PARA A APLICAÇÃO DOS SISTEMAS EM OBRA

A aplicação deste tipo de sistemas apenas deverá ser efectuada quando reunidas em obra um conjunto de condições a definir pelos fabricantes ao nível do respectivo documento de referência, entre as quais se podem destacar as seguintes [47] [58]:

- Fachadas, cobertura e restantes elementos em contacto com os componentes do sistema completamente terminadas e impermeabilizadas, incluindo as caixas de estore e as caixilharias exteriores (com vidros ou obstruídas de modo provisório);
- Aplicação em construção nova somente após os elementos de suporte terem sofrido a maior parcela da sua retracção inicial, o que implica um interregno entre quinze dias a um mês entre a conclusão dos elementos de suporte e a aplicação (função do tipo de suporte e das condições climáticas do local de aplicação);
- Posição dos ramais das diversas instalações (águas, electricidade, aquecimento, etc.) completamente definida;
- Ensaio de carga da tubagem de águas para detecção de fugas precedendo a colocação do elemento de revestimento;
- Pavimentos com a betonilha de assentamento do revestimento (caso seja essa a solução prevista) executada, de modo a impedir a humedificação das placas; sempre que tal não for possível devem adoptar-se soluções construtivas adequadas ao efeito, tais como as utilizadas em sanitários.

3.8 QUADRO-SÍNTESE

Neste ponto apresenta-se um quadro-síntese que pretende disponibilizar ao utilizador deste tipo de sistemas um conjunto de informações que lhe permitam, de uma forma expedita, seleccionar aquele que melhor se adequa à situação concreta que se lhe depara.

Ressalve-se contudo que a sua consulta deverá ser complementada pela leitura do conteúdo técnico deste capítulo, no qual são referidas particularidades relevantes a considerar na escolha do sistema, e justificada a classificação atribuída no Quadro 3.6.

Legenda

DR – Sistema do tipo directo	✓ – Utilização recomendável / corrente
SD – Sistema do tipo semi-directo	O – Utilização possível / solução pouco corrente
AP – Sistema do tipo autoportante	X – Utilização não recomendável / não aplicável (obras / sistemas correntes)

Quadro 3.6 – Quadro-síntese para selecção de um sistema de isolamento térmico pelo interior

Tipo de Sistema	DR	SD	AP
Características da Parede de Suporte			
Irregularidades inferiores a 10 mm	✓	✓	✓
Irregularidades compreendidas entre 10 e 20 mm	✓	O	✓
Irregularidades compreendidas entre 20 e 60 mm	✓	X	✓
Irregularidades superiores a 60 mm	X	X	✓
Aderência reduzida ^{a)}	X	✓	✓
Tipo de Elemento de Revestimento			
Placa de gesso cartonado (tipo STD, H, AD e BV)	✓	✓	✓
Outros tipos de placas de gesso cartonado	X ^{b)}	O	✓
Outros elementos de revestimento	X ^{b)}	O	✓
Integração de Instalações na Caixa de Ar			
Tubagens com desenvolvimento na direcção vertical	O ^{c)}	✓	✓
Tubagens com desenvolvimento na direcção horizontal	O ^{c)}	O ^{d)}	✓
Dimensão dos Elementos de Suporte			
Inferior a 20 mm	✓	✓	X
Compreendida entre 20 e 40 mm	✓	O	O
Superior a 40 mm	✓ ^{e)}	O	✓
Outros Aspectos			
Probabilidade de existência de pontes térmicas	✓	✓ ^{f)}	✓
Compatibilização entre desempenho térmico e acústico	✓	O	✓

a) De acordo com contactos encetados com as principais marcas comerciais não existem quaisquer ensaios de aderência correntemente utilizados, sendo esta decisão baseada na experiência dos aplicadores;

b) Para casos de obras correntes; para obras excepcionais admite-se que possam ser desenvolvidas soluções especiais com base num elemento de revestimento distinto;

c) Apesar de possível mediante a utilização de acessórios próprios ou sistemas específicos, considera-se que esta não deverá ser considerada uma valência do sistema em situações corrente;

d) Possível em troços de pequena dimensão (inferior à modulação definida) para soluções convencionais;

e) Com um valor limite de 60 mm;

f) Aspecto potencialmente problemático em soluções não convencionais.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DO DESEMPENHO FACE ÀS EXIGÊNCIAS HIGROTÉRMICAS DA ENVOLVENTE VERTICAL EXTERIOR

4.1 INTRODUÇÃO

A avaliação do desempenho de um edifício face às necessidades (implícitas) ou exigências (explícitas) dos seus utilizadores, ou seja da sua qualidade, poderá basear-se numa perspectiva funcional, decompondo-o nos seus diversos órgãos constitutivos e definindo as diferentes exigências consoante a função de cada órgão.

Esta abordagem é proposta na ISO 6241 [66], na qual se indicam os órgãos principais e secundários a considerar na subdivisão de um edifício (Quadro 4.1). No Quadro 4.2 são elencadas as principais exigências funcionais a atender pelo órgão secundário “envolvente exterior acima do solo”, objecto de estudo deste capítulo [67] [8].

Quadro 4.1 – Órgãos principais e secundários a considerar na subdivisão de um edifício [66] [67]

Órgãos Principais	Órgãos Secundários
Estrutura	Fundações
	Superestrutura
Envolvente exterior	Envolvente enterrada
	Envolvente acima do solo
Compartimentações exteriores à envolvente	Compartimentações exteriores verticais
	Compartimentações exteriores horizontais
	Escadas exteriores
Compartimentações interiores à envolvente	Compartimentações interiores verticais
	Compartimentações interiores horizontais

Órgãos Principais	Órgãos Secundários
Instalações e equipamentos diversos	Águas e saneamento
	Ventilação, aquecimento e ar condicionado
	Distribuição de gás
	Electricidade
	Telecomunicações e som
	Transporte mecânico e electromecânico
	Transporte gravítico e pneumático
	Segurança

Quadro 4.2 – Principais exigências funcionais relativas à envolvente exterior acima do solo [67] [8]

Exigências Funcionais	
Estabilidade mecânica	
Estanquidade à água	
Segurança contra incêndio	
Adaptação a movimentos	Movimentos das fundações
	Deformação estrutural
	Variações dimensionais ou deformações por variações de temperatura
	Variações dimensionais ou deformações devidas à humidade
	Acção química
Conforto	Higrotérmico
	Acústico
Adaptação à utilização	Segurança ao contacto
	Segurança contra a intrusão
	Conforto visual, olfactivo e tátil
Higiene, saúde e meio ambiente	
Durabilidade, economia e produtividade	

Por motivos já anteriormente explanados, a análise desenvolvida neste capítulo incide nos aspectos relacionados com o item “conforto higrotérmico”. De todo o modo, e na sequência dos dois capítulos antecedentes, resumem-se no Quadro 4.3 as principais implicações do sistema ao nível das diversas exigências funcionais explicitadas.

Quadro 4.3 – Síntese das principais implicações do sistema de isolamento térmico pelo interior ao nível das exigências funcionais da envolvente exterior acima do solo

Exigência Funcional	Desempenho do Sistema
Estabilidade mecânica	A posição do material isolante térmico não possui um efeito significativo ao nível da estabilidade mecânica da parede exterior.
Estanquidade à água	Deverá ser avaliada a qualidade da estanquidade oferecida pela solução global da envolvente exterior de acordo com documentos de referência (ex. DTU 20.1 [20]), não sendo a posição do material isolante térmico um factor condicionante para a concepção de uma solução adequada.
Segurança contra incêndio	A segurança contra incêndio não é deteriorada pelo posicionamento do material isolante térmico pelo interior, tendo sido já analisados no âmbito do Capítulo 2 os aspectos essenciais neste domínio.
Adaptação a movimentos	Tal como mencionado no Capítulo 3 recomenda-se para sistemas do tipo autoportante a interposição de um material resiliente entre a estrutura do edifício e a base e o topo do sistema de modo a absorver eventuais deformações estruturais. No Capítulo 2 foi já abordada a questão das variações de temperatura no seio da parede de base, tendo sido apresentadas soluções mínimas no sentido de garantir a durabilidade da solução. Uma análise complementar deste fenómeno é efectuada no seguimento do presente capítulo. Quanto aos demais aspectos referidos (Quadro 4.2) não são conhecidas implicações de destacar por parte do sistema em estudo, realçando-se que as questões ligadas à variação de humidade serão abordadas na análise do conforto higrotérmico.
Conforto	No Capítulo 2 foi já referida a influência deste tipo de sistemas ao nível do conforto acústico, designadamente no isolamento sonoro a ruídos de condução área produzidos no exterior ou no interior do edifício, e ainda, embora com uma menor influência, à mitigação da transmissão sonora por via sólida. Quanto ao conforto higrotérmico a sua análise será desenvolvida detalhadamente no seguimento do presente capítulo.
Adaptação à utilização	Não são conhecidas implicações relevantes por parte do sistema em estudo no que respeita aos aspectos referidos no Quadro 4.2.
Higiene, saúde e meio ambiente	Os principais aspectos neste domínio foram já realçados no §2.4.1.

Exigência Funcional	Desempenho do Sistema
Durabilidade, Economia e Produtividade	<p>A durabilidade deste tipo de sistemas, que define o período durante o qual o seu desempenho se mantém compatível com a satisfação dos vários requisitos funcionais, é em princípio superior comparativamente às dos sistemas pelo exterior, uma vez que se encontram menos expostos às diversas solicitações climáticas exteriores.</p> <p>Sob uma perspectiva puramente económica, a integração de um sistema de isolamento térmico pelo interior permite (a preços correntes de mercado, e a título meramente indicativo para edifícios residenciais) reduzir os custos em cerca de 50% quando comparado com um sistema aplicado pelo exterior.</p> <p>A produtividade associada a estes sistemas dependerá do rendimento da mão-de-obra na sua aplicação, não sendo conhecidos em Portugal quaisquer estudos a esse nível (por ex. para a tecnologia de gesso cartonado). Naturalmente que o seu valor somente poderá ser elevado após um período de adaptação da mão-de-obra nacional a uma tecnologia construtiva baseada na pré-fabricação da maioria dos componentes [56].</p>

Relativamente à análise do conforto (desempenho) higrotérmico desenvolvida nos pontos seguintes, efectua-se uma divisão em três domínios:

- Probabilidade de ocorrência de condensações internas;
- Gravidade associada à ocorrência de pontes térmicas;
- Variações de temperatura na parede exterior.

Refira-se que por uma questão de facilidade de apresentação e consulta se compilam no Anexo I as propriedades térmicas, hídricas e físicas relativas aos materiais utilizados nas simulações do desempenho higrotérmico.

4.2 CONDENSAÇÕES INTERNAS

4.2.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

A humidade constitui uma das principais causas das patologias existentes nos edifícios, associando-se normalmente a sua ocorrência a efeitos perniciosos ao nível dos materiais e soluções construtivas, tais como as variações dimensionais e (ou) deformações, diminuição da resistência mecânica, efeitos físico-químicos (ex. corrosão, eflorescências), biológicos (ex. fungos), destacando-se ao nível das soluções de isolamento térmico o aumento do coeficiente de condutibilidade térmica do material isolante.

A modelação detalhada da sua acção num elemento construtivo é assaz complexa, quer pela diversidade dos mecanismos que regem o seu transporte e fixação (Quadro 4.4), quer pela variabilidade das condições fronteira nos ambientes interior e exterior (temperatura, humidade relativa, precipitação, radiação solar e pressão do vento) [68].

Quadro 4.4 – Mecanismos de transporte e fixação da humidade num elemento construtivo [68]

Mecanismos de Transporte		Mecanismos de Fixação
Fase de Vapor	Difusão	Absorção Condensação Capilaridade
	Movimentos convectivos no interior dos poros	
Fase Líquida	Capilaridade	
	Gravidade	
	Gradientes de Pressão Externas	

Apesar da generalidade dos materiais utilizados na construção possuírem um determinado teor de humidade (relação entre a massa de água e a massa do material no estado seco), poderão propor-se como aceitáveis de modo a evitar a sua degradação para os materiais correntes em edifícios residenciais teores de humidade variando entre 3 e 5% [69].

Identificam-se tipicamente as seguintes fontes de humidade em elementos construtivos de edifícios residenciais [46] [69]:

- Processo construtivo, em consequência da utilização de elementos com teores de humidade superiores ao teor de humidade higroscópico;
- Contacto com o solo;
- Precipitação;
- Higroscopicidade;
- Condensações superficiais e (ou) internas;
- Causas fortuitas (ex. perfuração de tubagens).

No que concerne ao estudo do sistema de isolamento térmico pelo interior, a sua influência na ocorrência de humidade cinge-se quase exclusivamente aos fenómenos de condensação. Estes podem manifestar-se quer a nível superficial quer interno, consoante as condensações ocorram na superfície em contacto com o ambiente interior ou no seio dos materiais que constituem o elemento construtivo. Neste ponto abordar-se-ão somente as condensações internas, reservando-se para o §4.3 a análise relativa às condensações superficiais, desenvolvida no âmbito da avaliação do fenómeno das pontes térmicas.

Os principais objectivos associados ao estudo da humidade neste trabalho prendem-se com dois aspectos fundamentais:

- Manutenção do desempenho térmico projectado para a solução construtiva, evitando o aumento da condutibilidade térmica com a humidade;
- Manutenção das condições de durabilidade dos materiais.

Neste sentido, e não obstante a existência de uma tolerância face à quantidade máxima de fluxo condensado (referida em §2.3.2), assume-se como critério de validação de uma solução construtiva neste domínio a total ausência de condensações internas, nas condições da metodologia de cálculo seguidamente apresentada.

4.2.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO

A simulação da probabilidade de ocorrência de condensações internas numa dada solução construtiva pode efectuar-se para situações correntes (nas quais se enquadram os edifícios residenciais) através da aplicação da metodologia proposta na EN 13788 [34]. Trata-se de uma avaliação simplificada do fenómeno de difusão de vapor em elementos construtivos baseada no modelo de Glaser, cujos resultados devem ser entendidos como conservadores, atendendo ao domínio de pertinência do modelo [21] [34]:

- No início da análise o elemento de construção encontra-se seco, considerando-se que toda a humidade inerente ao processo construtivo foi já evaporada;
- Não são considerados os movimentos de ar através ou no interior das camadas, a sucção por capilaridade, ou a transferência do vapor condensado;
- Não são consideradas as variações das propriedades higrotérmicas dos materiais devido à presença de humidade ou à sua inércia higroscópica;
- A difusão de vapor efectua-se somente em regime permanente unidireccional.

4.2.2.1 MODELO DE GLASER

A aplicação do modelo alicerça-se na comparação entre a variação da pressão de saturação do vapor de água no interior de um elemento construtivo, em função da variação da sua temperatura interna, e a pressão de vapor de água prevista ao longo desse elemento.

Admitindo um regime permanente unidireccional para a transferência de vapor e de calor, serão aplicáveis respectivamente as leis de Fick (Equação 4.1) e de Fourier (Equação 4.2).

$$g = -\pi \times \frac{dp}{dx} \quad (4.1)$$

Sendo:

g – densidade de fluxo de difusão de vapor de água, $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$;

π – coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$;

dp/dx – gradiente de pressão de vapor de água, $[\text{Pa}/\text{m}]$.

$$q = -\lambda \times \frac{d\theta}{dx} \quad (4.2)$$

Sendo:

q – fluxo de calor por unidade de superfície, $[W/m^2]$;

λ – coeficiente de condutibilidade térmica, $[W/(m \cdot ^\circ C)]$;

$d\theta/dx$ – gradiente de temperatura, $[^\circ C/m]$.

A partir das condições climáticas interiores e exteriores (temperatura e humidade relativa), e conhecendo as propriedades higrotérmicas dos materiais que constituem o elemento construtivo (coeficiente de condutibilidade térmica e coeficiente de permeabilidade ao vapor de água), é possível determinar as pressões instaladas e as pressões de saturação que, no caso de coincidirem em algum ponto, originam condensações.

4.2.2.2 OUTRAS METODOLOGIAS DE CÁLCULO

O modelo de cálculo proposto por Glaser padece, como referido, de um conjunto de limitações que levaram ao desenvolvimento de metodologias de cálculo mais sofisticadas, tendo normalmente como base suportes informáticos (ex. [70]). Alguns destes modelos permitem considerar a transferência de humidade igualmente em fase líquida, a variação das propriedades dos materiais com o teor de humidade e temperatura, o efeito de equipamentos de controlo higrotérmico, e a modelação mais pormenorizada das condições climáticas exteriores, inclusive a transferência conjunta de humidade e calor.

Contudo, e conforme sublinhado no documento normativo citado [34], os dados de entrada dos modelos mais sofisticados são tão extensos que limitam a sua aplicabilidade em situações correntes, uma vez que a caracterização exaustiva dos ambientes higrotérmicos interior e exterior de um dado edifício não se encontra ainda facilmente disponível. Assim, a sua utilização somente será profícua para casos muito específicos nos quais os resultados obtidos serão obviamente mais fiáveis face aos baseados em modelos simplificados como o postulado por Glaser.

Por conseguinte, a opção pela utilização do modelo de Glaser, embora seja restritiva ao nível do grau de precisão dos resultados quantitativos obtidos (p.e. no que respeita às quantidades de vapor condensado num elemento construtivo), permite efectuar uma análise comparativa sustentada de soluções construtivas alternativas ao nível da probabilidade de ocorrência de condensações internas, numa base conservativa.

4.2.3 CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS DE REFERÊNCIA

Para a avaliação da ocorrência de condensações internas através do modelo de Glaser é necessário definir um conjunto de características térmicas para um dado período temporal, designadamente as temperaturas ambiente exterior e interior, a humidade relativa exterior, e a produção de vapor no interior de uma habitação. Sendo inequívoco que todos estes factores variam continuamente, a EN ISO 13788 [34] sugere a adopção de um período mensal para o qual deverão ser considerados valores médios.

4.2.3.1 AMBIENTE INTERIOR

A caracterização do ambiente interior efectua-se a partir da temperatura média mensal e da higrometria. A temperatura média mensal nos edifícios de habitação em Portugal é variável consoante o condicionamento térmico da envolvente exterior e os hábitos de climatização interior dos ocupantes, pelo que foram consideradas quatro situações com temperaturas médias mensais constantes (valores de 14, 16, 18 e 20 °C).

Quanto à higrometria, a referida norma [34] estabelece uma classificação em cinco classes com valores progressivamente mais elevados, em função da interrelação entre o tipo de ocupação do local, a taxa de ventilação e a temperatura exterior (Figura 4.1).

Das referidas cinco classes, apenas duas dizem respeito a edifícios residenciais (classe 3 para edifícios com ocupação baixa e classe 4 para edifícios com ocupação elevada) sendo as restantes referentes a locais de armazenamento (classe 1), espaços comerciais e de serviços (classe 2) e a espaços com uma produção de vapor no interior particularmente elevada tais como lavandarias e padarias (classe 5). Convém ainda mencionar que a classe 4 poderá englobar igualmente ginásios, cantinas e cozinhas.

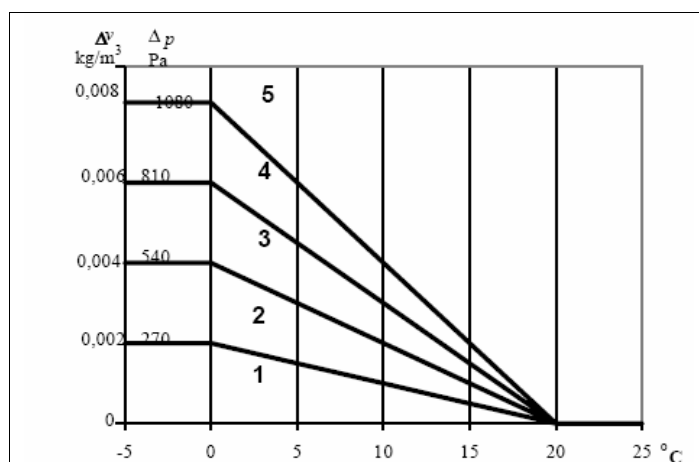


Figura 4.1 – Variação da higrometria com o tipo de ocupação do local, a taxa de ventilação e temperatura exterior, incluindo duas classes referentes a edifícios residenciais (3 e 4) [34]

Analisando a Figura 4.1 verifica-se que se considera a produção de vapor no interior dos edifícios directamente relacionada com a temperatura exterior, asserção desenvolvida para cenários de utilização de edifícios residenciais equipados com sistemas de aquecimento contínuo (situação típica em climas da Europa Central).

Em Portugal a temperatura interior nos edifícios é bastante variável, com um valor médio tipicamente reduzido, sendo as diferenças entre as temperaturas interior e exterior menos pronunciadas durante o Inverno, pelo que a variação expressa não poderá ser directamente transposta para a realidade nacional, como é aliás enfatizado em [30].

Deste modo, deverão estabelecer-se cenários aplicáveis aos edifícios de habitação em Portugal, apresentando-se no Quadro 4.5 os valores recomendados em [30] adaptados para higrometria ao invés do incremento de pressão de vapor no interior (400 e 830 Pa).

Refira-se que numa perspectiva conservativa se estabeleceu para a condutância térmica superficial interior (h_i) um valor de 4,0 W/(m²·°C) [30] (somente para a avaliação da ocorrência de condensações e não para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica da solução construtiva em avaliação).

Quadro 4.5 – Situações de referência relativamente à produção de vapor de água no interior de edifícios residenciais em Portugal [30]

Classificação	Descrição
Higrometria reduzida – 3,0 g/m ³	Edifício não sobreocupado e com caudais de ventilação adequados
Higrometria elevada – 6,0 g/m ³	Edifício sobreocupado e (ou) com ventilação deficiente

4.2.3.2 AMBIENTE EXTERIOR

Da análise apresentada em [30] conclui-se que para o cenário nacional não se afigura pertinente uma avaliação da probabilidade de ocorrência de condensações internas para meses cuja temperatura média exterior exceda 13 °C. Por conseguinte, apresentam-se no Quadro 4.6 os valores da temperatura média mensal exterior (em °C) e da humidade relativa média mensal exterior (em %) sugeridos em [30] como representativos das zonas climáticas de Inverno consideradas na regulamentação térmica nacional [27].

Quadro 4.6 – Valores médios mensais de temperatura (≤ 13 °C) e humidade relativa exterior (%) representativos das zonas climáticas de Inverno [30]

		Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Zona Climática I₁	T _{ext}	-	12,5	11,8	12,4	-	-
	HR _{ext}	-	80	81	78	-	-
Zona Climática I₂	T _{ext}	12,2	9,4	8,8	9,7	11,9	-
	HR _{ext}	80	82	81	77	77	-
Zona Climática I₃	T _{ext}	9,3	6,2	5,7	6,9	9,5	12,2
	HR _{ext}	80	83	82	77	72	67

O valor adoptado para a condutância térmica superficial exterior foi, de acordo com o recomendado em [34], de 25 W/(m²·°C).

4.2.4 ELEMENTO CONSTRUTIVO DE REFERÊNCIA

A definição de um elemento construtivo para a realização das simulações de desempenho depara-se com a necessidade da utilização de uma solução corrente que, dada a pouca penetração destes sistemas na indústria da construção nacional, se poderá indexar a países como a Espanha ou a França nos quais se encontram mais divulgados (embora adaptada às soluções construtivas tradicionais do nosso país).

Optou-se assim pela consideração de um elemento constituído por uma parede de suporte em alvenaria de tijolo furado de 22 cm (espessura mínima recomendada em [41] para uma parede simples com isolamento térmico pelo interior) rebocada exteriormente, uma placa de revestimento em gesso cartonado de 12,5 mm como elemento de revestimento, e uma caixa de ar parcialmente preenchida por material isolante térmico, com uma dimensão fixa de 2 cm para a lâmina de ar não ventilada (Figura 4.2). Note-se que a opção por uma caixa de ar com 2 cm de espessura permite readaptar o elemento considerado a qualquer um dos três tipos de sistema de isolamento térmico pelo interior (Capítulo 3).

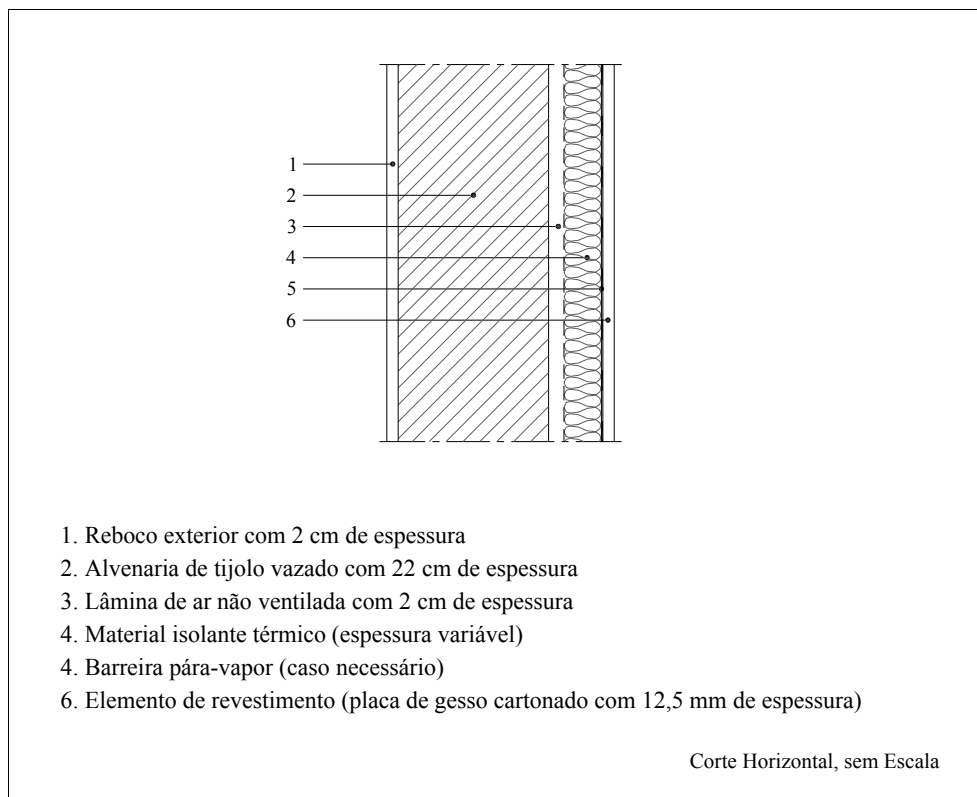


Figura 4.2 – Esquema ilustrativo do elemento construtivo considerado para a avaliação da probabilidade de ocorrência de condensações internas

Quanto à espessura do material isolante térmico, e de modo a desenvolver as simulações para diferentes níveis de qualidade térmica da envolvente, optou-se pela sua quantificação a partir dos valores dos coeficientes de transmissão térmica de referência (U_{ref}) definidos na regulamentação térmica nacional [27] minorados de acordo com os coeficientes propostos por Pinto [18] (Quadro 4.7).

A definição destes coeficientes consta da metodologia de selecção exigencial de materiais isolantes térmicos proposta pelo autor [18] que estabelece quatro níveis de qualidade (N1 a N4), traduzindo-se em valores máximos do coeficiente de transmissão térmica (U) para os diversos elementos que constituem a envolvente. Assim, e para o caso do elemento construtivo considerado, os diferentes valores de U podem ser assegurados fazendo variar somente a espessura do material isolante (considerou-se para o material isolante térmico um coeficiente de condutibilidade térmica característico de $0,04 \text{ W/(m} \cdot \text{°C)}$).

Quadro 4.7 – Espessura de material isolante térmico para diferentes níveis de qualidade térmica

Nível de Qualidade	Paredes em Contacto com Espaços Exteriores					
	Coeficiente de Transmissão Térmica U [W/(m ² ·°C)]			Espessura Mínima Isolante Térmico [cm]		
	I1	I2	I3	I1	I2	I3
N1	0,64-0,70	0,55-0,60	0,46-0,50	3	4	5
N2	0,50-0,63	0,43-0,54	0,36-0,45	4	4	6
N3	0,36-0,49	0,31-0,42	0,26-0,35	5	7	8
N4	≤ 0,35	≤ 0,30	≤ 0,25	8	10	13

Atendendo às espessuras obtidas, optou-se por considerar somente 3 níveis de qualidade (N1 a N3), dado que o nível de qualidade N4 apresenta um coeficiente de minoração de 0,5 o que, conjugado com os valores de U_{ref} propostos pela actual regulamentação [27] impõe espessuras de material isolante térmico extremamente elevadas, que dificilmente serão implementadas tendo em conta a tradição construtiva nacional (note-se que os valores de U_{ref} foram reduzidos para cerca de metade dos definidos pela antiga regulamentação [6]). Aliás os próprios coeficientes de minoração foram desenvolvidos a partir dos antigos coeficientes de transmissão térmica de referência [6]. Saliente-se ainda que, de uma forma conservativa, não foi considerado o contributo das placas de gesso cartonado.

4.2.5 CÁLCULOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Contrariamente à abordagem correntemente utilizada para a avaliação da probabilidade de ocorrência de condensações internas, efectuada para um dado valor de higrometria a partir de um par de valores de temperatura interior e exterior, entendeu-se mais adequado neste caso proceder à determinação do valor mínimo de higrometria passível de originar condensações internas. Deste modo os resultados obtidos permitem desde logo avaliar a probabilidade de um determinado ambiente higrotérmico interior potenciar a ocorrência de condensações internas.

Para o efeito utilizou-se como ferramenta de cálculo o programa CONDENSE 2000 [41] nas condições de simulação anteriormente referidas, sendo os primeiros resultados obtidos apresentados nas Quadros 4.8, 4.9 e 4.10, considerando como material isolante térmico uma solução em lã de rocha com 50 kg/m^3 .

Quadro 4.8 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] passíveis de originar condensações internas na zona climática II (material isolante térmico – lã de rocha 50 kg/m^3)

Espessura Isolante Térmico [cm]	Temperatura Interior [°C]			
	14	16	18	20
3	2,6	3,1	3,6	4,1
4	2,6	3,0	3,4	3,9
5	2,5	2,9	3,3	3,7
6	2,5	2,9	3,2	3,6
7	2,5	2,8	3,1	3,5
8	2,5	2,7	3,1	3,4

Na zona climática II (Quadro 4.8) verifica-se que para valores de temperatura interior de 18 e 20 °C não ocorrem condensações internas para qualquer espessura de material isolante térmico desde que seja garantida uma higrometria inferior a 3 g/m^3 (que de acordo com o Quadro 4.6 corresponderá a um edifício não sobreocupado e com ventilação adequada).

Para uma t_{int} de 16 °C a ocorrência de condensações internas dá-se já com valores de higrometria reduzidos, enquanto que para uma t_{int} de 14 °C (pouco acima da temperatura média exterior na zona climática I1) a higrometria máxima aproxima-se já do valor de referência de um desempenho óptimo de ventilação interior (2,5 g/m³).

É pois possível verificar a importância associada ao aquecimento do ambiente interior na prevenção da ocorrência de condensações internas. É igualmente interessante notar neste primeiro conjunto de resultados a influência negativa do aumento da espessura do material isolante térmico que determina sempre uma redução da higrometria máxima admissível.

Quadro 4.9 – Valores mínimos de higrometria [g/m³] passíveis de originar condensações internas na zona climática I2 (material isolante térmico – lã de rocha 50 kg/m³)

Espessura Isolante Térmico [cm]	Temperatura Interior [°C]			
	14	16	18	20
3	2,7	3,1	3,6	4,0
4	2,6	2,9	3,3	3,7
5	2,5	2,8	3,2	3,5
6	2,4	2,7	3,1	3,4
7	2,4	2,7	3,0	3,3
8	2,3	2,6	2,9	3,2

Na zona climática I2 (Quadro 4.9) a situação agrava-se naturalmente em função da maior severidade do clima exterior, sendo que inclusivamente para uma t_{int} de 18 °C ocorrem já condensações internas para uma higrometria não superior a 3 g/m³ desde que a espessura do material isolante térmico igual ou superior a 7 cm, embora seja ainda possível a utilização do sistema desde que garantidas condições de ventilação adequadas.

Os resultados obtidos mostram novamente a importância do aquecimento do ambiente interior, já que para uma t_{int} de 14 °C não é possível evitar a ocorrência de condensações internas para espessuras de material isolante térmico superiores a 5 cm, mesmo que fosse garantida uma higrometria óptima de 2,5 g/m³.

Quadro 4.10 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] passíveis de originar condensações internas na zona climática I3 (material isolante térmico – lã de rocha 50 kg/m^3)

Espessura Isolante Térmico [cm]	Temperatura Interior [°C]			
	14	16	18	20
3	2,7	3,1	3,5	3,9
4	2,5	2,9	3,2	3,6
5	2,4	2,7	3,0	3,3
6	2,3	2,6	2,9	3,1
7	2,2	2,5	2,7	3,0
8	2,2	2,4	2,6	2,9

A situação revela-se deveras desfavorável para a zona climática I3 (Quadro 4.10), já que para uma t_{int} de conforto (20°C) a manutenção de uma higrometria máxima de 3 g/m^3 não assegura a ausência de condensações internas com espessuras de material isolante térmico elevadas, sendo que somente o valor óptimo de $2,5 \text{ g/m}^3$ é suficiente para uma t_{int} de 18°C e uma espessura de isolante térmico de 8 cm, o que demonstra novamente o efeito da severidade do clima exterior.

Note-se que nesta zona climática são perfeitamente comuns (e recomendáveis) espessuras de material isolante térmico elevadas (veja-se a título de exemplo o Quadro 4.7), pelo que se conclui não ser viável a utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior (para o material isolante térmico definido – lã de rocha), caso não se garantam condições óptimas de ventilação no interior do edifício, sem a integração de uma barreira pára-vapor.

De facto, as mesmas simulações desenvolvidas com o elemento construtivo integrando uma barreira pára-vapor colocada entre o elemento de revestimento e o material isolante térmico, permitem concluir que é viável a utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior para qualquer uma das situações propostas mesmo com valores de higrometria superiores a 3 g/m^3 , passando o limite da higrometria máxima interior a ser condicionado igualmente pela possibilidade de ocorrência de condensações superficiais.

Uma vez verificado que a espessura do material isolante térmico possui um efeito notório na higrometria máxima admissível, efectuou-se uma avaliação da influência do valor do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água para outros materiais, designadamente poliuretano (PU), poliestireno expandido (PE), poliestireno extrudido (PX) e vidro celular (VC). Por uma questão de simplicidade de análise, e atendendo às conclusões pretendidas, limitaram-se as simulações às duas espessuras extremas de material isolante – 3 e 8 cm. Os resultados obtidos são compilados nos Quadros 4.11, 4.12 e 4.13.

Quadro 4.11 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] para diversos materiais isolantes térmicos passíveis de originar condensações internas na zona climática I1

Espessura Isolante Térmico [cm]	Temperatura Interior [°C]															
	14				16				18				20			
	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC
3	3,2	3,1	3,2	3,1	3,9	3,7	4,6	4,5	4,5	4,3	6,1	5,9	5,0	4,9	7,4	7,5
8	3,3	3,3	3,3	3,2	4,7	4,2	4,8	4,7	5,1	4,6	6,5	6,3	5,6	5,1	8,4	8,1

Quadro 4.12 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] para diversos materiais isolantes térmicos passíveis de originar condensações internas na zona climática I2

Espessura Isolante Térmico [cm]	Temperatura Interior [°C]															
	14				16				18				20			
	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC
3	3,3	3,2	3,3	3,3	3,8	3,7	4,7	4,6	4,3	4,2	6,2	6,0	4,8	4,8	7,1	7,5
8	3,5	3,4	3,4	3,4	4,3	3,9	5,0	4,8	4,7	4,3	6,6	6,5	5,1	4,6	8,5	8,2

Quadro 4.13 – Valores mínimos de higrometria [g/m^3] para diversos materiais isolantes térmicos passíveis de originar condensações internas na zona climática I3

Espessura Isolante Térmico [cm]	Temperatura Interior [°C]															
	14				16				18				20			
	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC	PU	PE	PX	VC
3	3,2	3,2	4,5	4,4	3,7	3,6	5,4	5,6	4,1	4,1	6,1	7,0	4,5	4,6	6,8	8,5
8	3,6	3,2	4,8	4,7	3,9	3,6	6,3	6,1	4,2	3,9	7,9	7,7	4,5	4,2	8,5	9,4

Dos resultados obtidos constata-se que qualquer um dos materiais isolantes térmicos propostos permite evitar a ocorrência de condensações internas, inclusive para valores de t_{int} de 14 °C, desde que a higrometria interior não ultrapasse 3,0 g/m³. Conclui-se pois que a elevada permeabilidade ao vapor de água da lã de rocha quando comparada com os seus congêneres avaliados neste trabalho (cerca de 25 vezes superior ao poliestireno expandido moldado e de 100 vezes superior ao poliestireno expandido extrudido) revela ser uma desvantagem face à probabilidade de ocorrência de condensações internas.

É igualmente interessante notar que contrariamente ao caso da lã de rocha, para a qual o acréscimo da espessura determina uma diminuição na higrometria máxima admissível, nos demais materiais isolantes térmicos o efeito do acréscimo da espessura na probabilidade de ocorrência de condensações internas é tendencialmente benéfico, sendo mais notório à medida que se aumenta a temperatura interior e se diminui o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material isolante térmico (observe-se o desempenho do poliestireno extrudido e do vidro celular). A possibilidade de ocorrência de condensações superficiais passa novamente a condicionar a higrometria máxima obtida em algumas simulações.

Importa a propósito advertir que uma diminuição da permeabilidade ao vapor de água da envolvente exterior dos edifícios residenciais apenas será benéfica no que respeita às condensações internas, sendo obrigatória a sua conjugação com um sistema de ventilação adequado de modo a evitar a ocorrência de condensações superficiais.

Na sequência da análise efectuada resumem-se as seguintes conclusões:

- Relativamente às regras de concepção existentes neste domínio, é interessante constatar que a regra 3 constante do Quadro 2.9 permite que se defina um valor máximo de espessura de material isolante térmico para uma dada parede, acima do qual será necessário garantir uma resistência à difusão de vapor mínima para a placa de revestimento e o material isolante térmico (Quadro 2.10), o que se coaduna com os resultados obtidos (melhor desempenho com a diminuição do valor de permeabilidade ao vapor de água do material isolante térmico);

- As condições climáticas exteriores possuem uma influência notória na ocorrência de condensações internas (tal como já referido em [20]), tendo-se observado um desempenho particularmente desfavorável para a zona climática I3;
- A temperatura do ambiente interior apresenta igualmente uma influência notória na prevenção da ocorrência de condensações internas;
- As condições de ventilação possuem uma influência decisiva na prevenção da ocorrência de condensações internas; para valores de higrometria de 3 g/m³ ou inferiores é viável (conjugando com a natureza do material isolante térmico) a integração de um sistema de isolamento térmico pelo interior sem necessidade de recorrer a uma barreira pára-vapor.

Deverá ainda advertir-se para o tipo de revestimento exterior das paredes exteriores (que no caso das simulações desenvolvidas foi considerado um reboco de ligantes hidráulicos), que pode implicar a existência de uma resistência elevada à difusão de vapor. Como regra de concepção geral, as resistências à difusão de vapor deverão diminuir do interior para o exterior do elemento construtivo.

4.3 PONTES TÉRMICAS

4.3.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

A designação ponte térmica, quando aplicada a edifícios, pretende assinalar a existência de uma zona da sua envolvente na qual a resistência térmica é substancialmente inferior em relação à verificada na zona construtiva corrente (Figura 4.3), em consequência de uma mera alteração de geometria (ex. cunhal sem pilar numa parede exterior) e (ou) pela interposição total ou parcial de um elemento construtivo com um coeficiente de condutibilidade térmica distinto (ex. violação de uma parede exterior por parte de um pilar estrutural) [28].

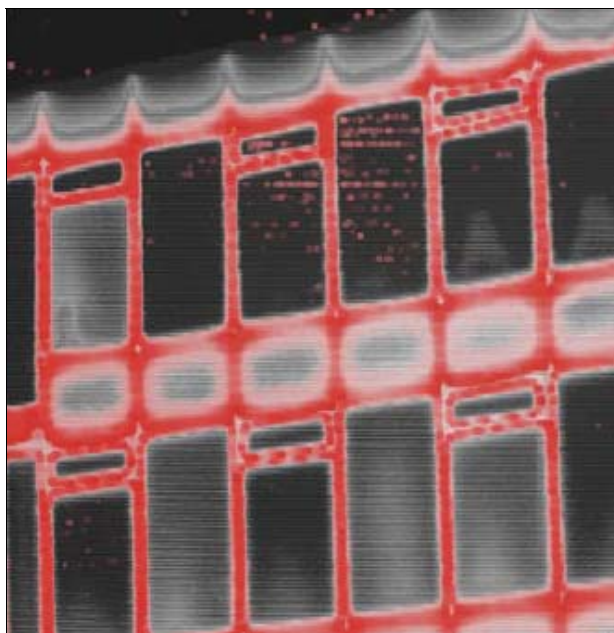


Figura 4.3 – Análise por termografia da temperatura superficial de uma fachada identificando-se diversas zonas de ponte térmica [29]

Em edifícios residenciais, as pontes térmicas mais comuns são do tipo bidimensional, igualmente apelidadas de pontes térmicas lineares. Para além destas, existem ainda as pontes térmicas pontuais, sempre que um elemento construtivo é perfurado por um elemento com uma elevada condutibilidade térmica, e as pontes térmicas tridimensionais, que resultam da junção de três elementos construtivos (cuja avaliação não se justifica em edifícios correntes [30]).

A necessidade de uma análise aprofundada do fenómeno das pontes térmicas advém dos seus efeitos lesivos em dois aspectos determinantes para a viabilidade técnico-económica de um qualquer empreendimento – sustentabilidade ambiental e habitabilidade.

A sua ocorrência afecta a sustentabilidade ambiental na medida em que introduz um acréscimo da perda térmica para o exterior (ou para espaços não aquecidos), o que, para um nível de conforto térmico constante no interior dos edifícios, se traduz num aumento das necessidades de consumo energético, comprometendo parcialmente o tão necessário propósito da sua racionalização energética.

Quanto à habitabilidade, esta é deteriorada pelo facto das pontes térmicas determinarem assimetrias da temperatura superficial na envolvente (desde logo um factor de desconforto térmico [71]) que estão na origem do aparecimento de diversas patologias, das quais as condensações superficiais e o (possível) posterior desenvolvimento de bolores representam aquelas a que a generalidade das pessoas são mais sensíveis [31] (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Condensações superficiais por efeito de uma ponte térmica (e de infiltrações)

Refira-se que as pontes térmicas constituem normalmente apenas um dos factores associados a este tipo de patologia, que poderão igualmente resultar das deficientes condições de ventilação, aquecimento e de isolamento térmico e, normalmente em menor grau, da higroscopicidade dos revestimentos interiores. Exemplos de outras consequências com impacto negativo na habitabilidade dos edifícios são o aparecimento de manchas resultantes da deposição desigual de pó nas superfícies interiores (retenção mais fácil nas zonas mais frias) e a degradação e (possível) fissuração de tintas e revestimentos.

A utilização generalizada da solução construtiva de parede dupla na envolvente exterior dos edifícios residenciais em Portugal (mais problemática ao nível da correcção de pontes térmicas se comparada com a solução de isolamento térmico pelo exterior [31]), com estratégias de correcção responsáveis pelo surgimento de outros defeitos construtivos [33], conjugada com o incremento das exigências de conforto térmico que têm determinado a inclusão de espessuras mais elevadas de material isolante térmico, levou à generalização das patologias a elas associadas nos edifícios residenciais em Portugal.

Neste ponto procede-se a uma análise do fenómeno das pontes térmicas relacionadas com a utilização de sistemas de isolamento térmico pelo interior, com o propósito de minimizar os efeitos da sua ocorrência em situações de construção nova, cujas conclusões permitem igualmente definir estratégias de intervenção em reabilitação de edifícios.

Para tal, será analisado o desempenho de um conjunto de configurações construtivas que procuram representar situações correntes em edifícios do segmento residencial, quer resultantes de erros de concepção e (ou) de construção, quer ainda de desconhecimento técnico na implementação deste tipo de sistema.

4.3.2 DESCRITORES DE DESEMPENHO

A avaliação objectiva da gravidade associada à ocorrência de uma ponte térmica implica a definição de descritores de desempenho que permitam uma quantificação do seu efeito para uma dada configuração construtiva. Na sequência do exposto no ponto anterior, essa avaliação deverá considerar a probabilidade de ocorrência de condensações superficiais (condições de habitabilidade) e a quantificação do acréscimo de perda térmica para o exterior (condições de sustentabilidade ambiental), efectuada respectivamente a partir dos descritores f_{Rsi} e ψ (definidos no Capítulo 2).

Na actual regulamentação térmica nacional [27] adoptou-se o valor de ψ calculado pelas dimensões interiores (ψ_i), embora no documento de referência europeu para a avaliação de pontes térmicas [30] se recomende a avaliação através do índice ψ baseado em dimensões exteriores (ψ_e), já que deste modo é contabilizada toda a área exterior da envolvente,

englobando assim, pelo menos de forma parcial, o efeito de eventuais pontes térmicas. No caso deste trabalho são apresentados os resultados relativos aos dois índices, de forma a permitir avaliar a sua influência na avaliação qualitativa do fenómeno, já que sob um ponto de vista quantitativo a avaliação será semelhante, isto é, ambos os parâmetros representam exactamente o mesmo fenómeno físico.

Em [33] o critério adoptado para a avaliação das pontes térmicas baseou-se na limitação da probabilidade de ocorrência de condensações superficiais, com o argumento de que as soluções aceitáveis a este nível conduzem normalmente a perdas térmicas reduzidas.

No entanto, entende-se que para o cenário da actual regulamentação térmica [27], no qual os coeficientes de transmissão térmica de referência são reduzidos para cerca de metade dos valores anteriormente vigentes [6], deverá ser igualmente estabelecido um critério de avaliação ao nível do acréscimo de perdas térmicas para o exterior.

Por outro lado, a ocorrência de condensações superficiais depende de outros factores (temperaturas interior e exterior e humidade relativa interior) pelo será prudente para uma situação concreta a comparação entre as temperaturas superficial Θ_{si} e de ponto de orvalho Θ_{dp} . Assim, os valores determinados para o factor de temperatura f_{Rsi} apresentam somente um cariz informativo, possibilitando em todo o caso a determinação de Θ_{si} desde que conhecidos os referidos descritores higrotérmicos dos ambientes exterior e interior.

4.3.3 METODOLOGIA DE CÁLCULO

A metodologia adoptada baseia-se num modelo de simulação numérica considerando um regime permanente bidimensional, mediante a aplicação de uma ferramenta informática com a designação “Kobra” (versão 2.0), originária do projecto europeu “Eurokobra”.

A definição da zona de ponte térmica efectua-se com base numa configuração construtiva constituída por uma zona central (representando a ponte térmica propriamente dita) e por duas zonas marginais relativas à zona construtiva corrente. As dimensões dos elementos marginais (relativamente aos planos de corte) são as recomendadas pela EN 10211-2 [72], regra geral num plano de simetria se a distância entre aqueles e o elemento central é inferior a 1 m, ou a pelo menos 1 m do elemento central (Figura 4.5).

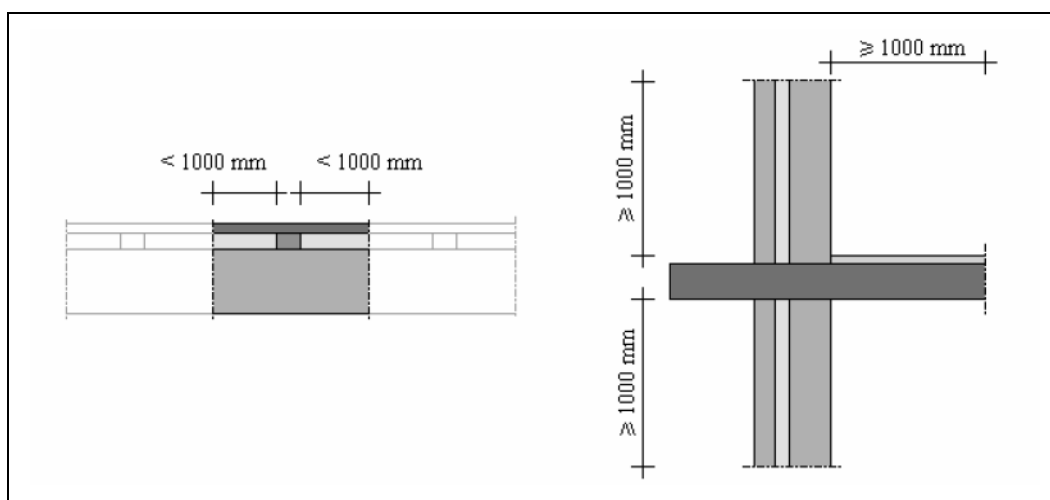


Figura 4.5 – Distâncias a respeitar face aos planos de corte dos elementos marginais [30]

O programa encontra-se estruturado num conjunto predefinido de famílias de soluções construtivas, entre as quais se encontram as paredes com isolamento térmico pelo interior. Para cada família de soluções existem até 16 situações distintas representando as pontes térmicas habituais em edifícios residenciais, para as quais são disponibilizadas diversas configurações construtivas. Os resultados da simulação permitem avaliar a influência da ponte térmica através dos descritores de desempenho definidos (Figura 4.6).

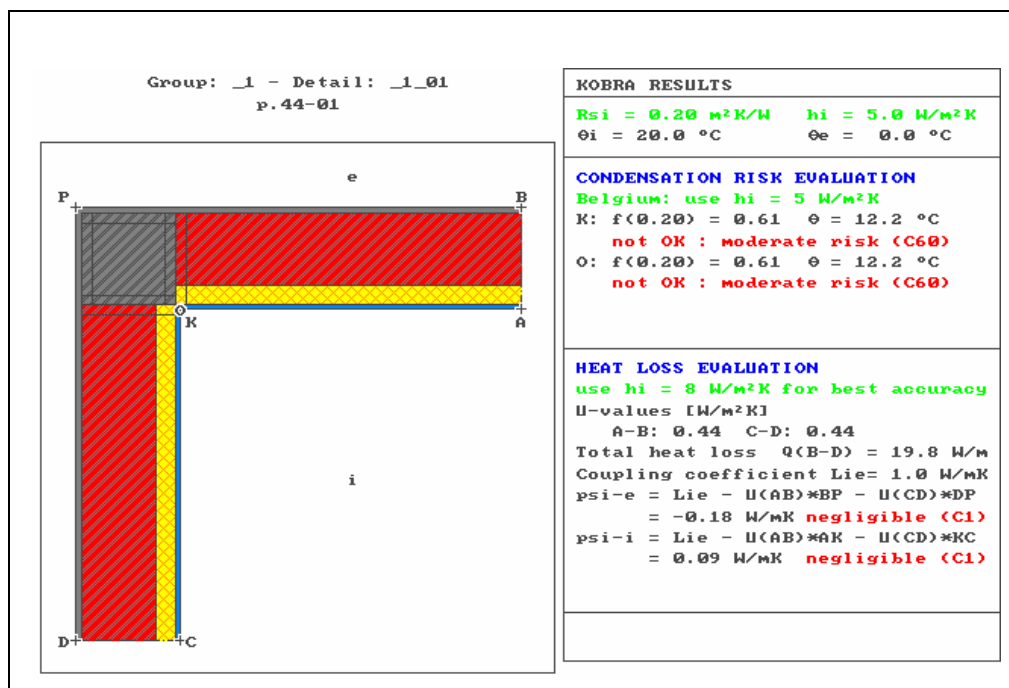


Figura 4.6 – Aspecto dos resultados globais apresentados pelo programa “Kobra”

A sua principal vantagem reside no facto de permitir ao utilizador editar as configurações construtivas disponíveis (dimensões e condutibilidade térmica dos materiais) bem como as condições higrotérmicas de referência (temperaturas interior e exterior, apesar do seus valores não influenciarem os resultados obtidos para os dois parâmetros de avaliação definidos, e as condutâncias superficiais interior e exterior). A sua principal desvantagem advém da limitação na implementação de algumas soluções de reabilitação ou de soluções construtivas alternativas às disponibilizadas pela base de dados original do programa.

4.3.4 CONDIÇÕES HIGROTÉRMICAS DE REFERÊNCIA

Tal como na análise respeitante ao fenómeno das condensações internas, também para a avaliação das consequências da ocorrência de pontes térmicas há que definir ambientes térmicos padrão para um dado período temporal, designadamente as temperaturas exterior e interior e a humidade relativa interior, novamente recorrendo a valores médios mensais.

Saliente-se que esta necessidade deriva exclusivamente da intenção de avaliar de uma forma efectiva (apesar de baseada em condições de temperatura e humidade relativa prováveis) a ocorrência de condensações superficiais, pois para a determinação dos dois descritores de desempenho seleccionados (f_{Rsi} e ψ) somente seriam necessários os valores da condutância térmica superficial interior e exterior.

4.3.4.1 AMBIENTE EXTERIOR

O ambiente exterior é caracterizado pela temperatura média mensal exterior. Para a condutância térmica superficial exterior adoptou-se um valor de $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [28].

4.3.4.2 AMBIENTE INTERIOR

O ambiente interior é caracterizado pelos valores médios mensais da temperatura e da humidade relativa interiores.

Sublinhe-se que na avaliação da probabilidade de ocorrência de condensações superficiais, mais propriamente no cálculo de f_{Rsi} , se verifica uma forte dependência do resultado em função do valor de h_i definido que, para um regime permanente, permite, de acordo com a formulação de Fourier (Equação 4.2), determinar a temperatura superficial interior (Θ_{si}) com base na diferença de temperaturas interior e exterior e na resistência térmica do elemento construtivo (daí a necessidade de definir a resistência superficial adoptada na avaliação, “ R_{si} ”, no resultado obtido f_{Rsi}). Se para o valor de h_e a norma de cálculo [28] estabelece um valor invariável, já para o valor de h_i apresenta um conjunto de valores que variam em função do tipo e situação do elemento construtivo (Quadro 4.14).

Quadro 4.14 – Valores de referência para a condutância térmica superficial interior (h_i) [28]

Situação	h_i [W/(m ² ·°C)]
Envidraçados	7,70
Metade superior do compartimento	4,00
Metade inferior do compartimento	2,86
Atrás de móveis	2,00

O seu uso revela-se problemático já que os valores propostos se referem somente à avaliação do risco de ocorrência de condensações superficiais. No entanto recomenda-se para o cálculo da transferência de calor na direcção horizontal um valor de 7,7 W/(m²·°C) [73]. Consequentemente a avaliação de uma ponte térmica de acordo com a normalização europeia obriga a desenvolver simulações independentes, consoante esteja em análise a avaliação do risco de condensação superficial (foi adoptado um valor de 4,0 W/(m²·°C) [34]) ou da transferência de calor para o exterior (7,7 W/(m²·°C) [73]).

4.3.5 ELEMENTO CONSTRUTIVO DE REFERÊNCIA

Optou-se pela consideração dum elemento construtivo similar ao utilizado nas simulações referentes às condensações internas, apesar de se ter restringido as variações definidas para a espessura do material isolante térmico aos valores extremos de 3 cm e 8 cm, dadas as diferenças mínimas verificadas nos resultados. Note-se que por limitações do programa não foi possível a integração de uma lâmina de ar, factor que não se revela determinante já que a sua resistência térmica será para a finalidade em causa desprezável (Figura 4.7).

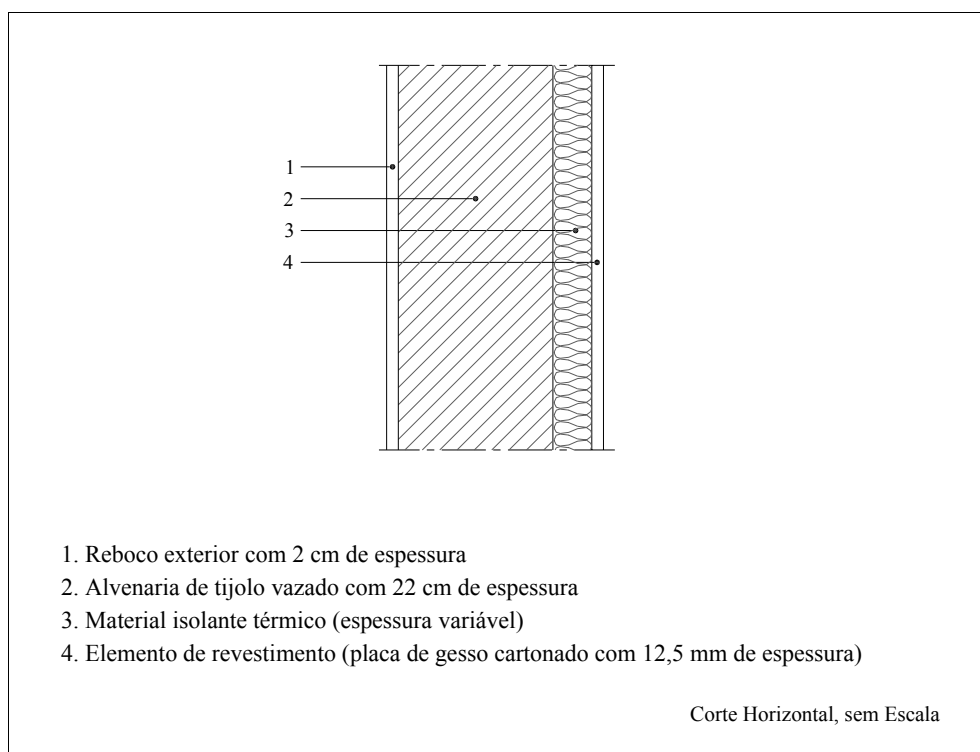


Figura 4.7 – Esquema ilustrativo do elemento construtivo considerado para a avaliação da gravidade associada à ocorrência de pontes térmicas

Um aspecto que importa esclarecer prende-se com a dimensão definida para os elementos estruturais nas diferentes situações estudadas. O procedimento genericamente aceite a nível científico, tendo sido já adoptado por Abreu [33], baseia-se nos estudos de sensibilidade desenvolvidos por Corvacho [32].

No caso da presença dum pilar em zona de cunhal é demonstrado não existir uma variação significativa de ψ e f_{Rsi} com a dimensão do seu prolongamento ao longo de uma das paredes exteriores, sendo esta substancial somente quando comparadas as situações de um pilar confinado com um pilar não confinado. Deste modo considerou-se nas simulações efectuadas um prolongamento fixo de 0,15 m além da espessura da parede, valor similar ao utilizado por Abreu [33].

Para a altura das vigas de bordadura as conclusões são sensivelmente iguais, quer para a ligação entre uma parede exterior e uma viga da laje de cobertura, quer entre uma parede exterior e uma viga da laje de piso intermédio, pelo que se considera uma altura constante de 0,30 m medida a partir da face inferior da laje [33].

Relativamente à espessura das lajes consideraram-se valores de 0,20 m para as lajes de cobertura e de 0,25 m para as lajes de nível intermédio (valores julgados representativos de dimensões estes elementos), embora em [32] se conclua que para a ligação da laje de nível intermédio o valor de f_{Rsi} diminui com o aumento da espessura da laje (menos pronunciado no caso da laje de cobertura), e que ψ aumenta com a espessura da laje, quer para uma laje de piso intermédio quer para uma laje de cobertura.

Já quanto à platibanda a autora [32] concluiu que a espessura do elemento construtivo é preponderante nos resultados obtidos, sendo desprezável a influência da altura. Tal como em [33] adoptou-se para este elemento uma espessura de 0,15 m.

Com um carácter mais genérico refira-se que se considerou ao nível da cobertura uma solução convencional em betão de inertes de argila expandida com espessura média de 0,10 m e uma massa volúmica aparente compreendida entre 600 e 800 kg/m³ [24].

Nas lajes de pavimento (entre pisos e sobre espaço exterior) considerou-se a existência de uma betonilha de regularização e enchimento com uma espessura média de 0,10 m em betão de inertes de argila expandida (valor de massa volúmica aparente compreendido entre 1000 e 1200 kg/m³), não tendo sido incluído nos dois casos qualquer revestimento de modo a simular a situação mais desfavorável.

Para as configurações das lajes de cobertura e sobre um espaço exterior, as espessuras de material isolante térmico utilizadas nas simulações foram determinadas a partir da aplicação da referida metodologia de selecção exigencial [18] aos coeficientes de transmissão térmica de referência preconizados na actual regulamentação térmica [27].

Apresenta-se seguidamente (Quadro 4.15) uma lista das configurações de ponte térmica analisadas, visando codificar o conjunto das simulações efectuadas de modo a facilitar a apresentação e discussão de resultados nos pontos seguintes. O código proposto pretende subdividir as várias configurações (C) por tipos de ligação, com a necessidade da atribuição de sub-índices para a distinção da inserção de elementos estruturais, assim como para diferentes espessuras de material isolante térmico.

Quadro 4.15 – Quadro-síntese das configurações de ponte térmica analisadas

Código		Tipo de Ligação	Observações
C1	C1.1.x	Duas paredes exteriores (cunhal)	Pilar confinado
	C1.2.x		Pilar não confinado
C2	C2.1.x	Laje de cobertura e parede exterior	Sem viga
	C2.2.x		Com viga
C3	C3.1.x	Laje intermédia e parede exterior	Sem viga
	C3.2.x		Com viga
C4	C4.1.x	Laje sobre espaço exterior e parede exterior	Sem viga
	C4.2.x		Com viga
C5	C5.1.x	Pilar em zona corrente da parede exterior	Confinado
	C5.2.x		Não confinado
C6	C6.1.x	Parede interior e parede exterior	Sem pilar
	C6.2.x		Pilar confinado
	C6.3.x		Pilar não confinado

Nota: o valor de x corresponde à espessura de material isolante térmico (3 cm ou 8 cm).

Note-se que o conjunto de configurações estudado não pretende ser exaustivo de todas as situações de ponte térmica passíveis de ocorrer em edifícios residenciais, limitando-se a destacar aquelas para as quais a utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior se poderá revelar mais problemática, particularmente quando comparada quando a situação de isolamento térmico pelo exterior.

Exemplos paradigmáticos são o da ligação de uma parede exterior com a caixilharia ou com uma caixa de estore, para as quais é possível desprezar o efeito da ponte térmica mediante uma pormenorização construtiva adequada (ver ponto seguinte) para ambos os sistemas de isolamento térmico (aliás na actual regulamentação térmica [27] considera-se um valor de $\psi = 0$ nestes dois casos, desde que se proceda à referida correcção).

4.3.6 SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO

Por questões de facilidade na consulta dos resultados, e procurando evitar que a sua análise se torne fastidiosa para o leitor, optou-se pela apresentação no Anexo II de um conjunto de mapas de cálculo respeitantes às diversas configurações analisadas. Para cada configuração são directamente calculados pelo programa três parâmetros, independentes das condições climáticas interiores e exteriores: f_{Rsi} , $\psi_{i,e}$ e $L_{i,e}$. Destes, somente o último não foi ainda definido, correspondendo à perda térmica total entre o interior e o exterior na zona de ponte térmica, por unidade de comprimento da ponte térmica (designado por “thermal coupling coefficient” [28]) (Equação 4.3).

$$L_{i,e} = \sum U_i \cdot l_i + \psi \quad (4.3)$$

Sendo:

$L_{i,e}$ – perda térmica linear em zona de ponte térmica, [W/(m·°C)];

U_i – coeficiente de transmissão térmica do elemento i , [W/(m²·°C)];

l_i – comprimento do elemento i , [m];

ψ – coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear, [W/(m·°C)].

Complementarmente é exposto um diagrama (Figura 4.8) destinado a avaliar a influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais. Através da sua consulta é possível determinar, para um dado par de temperaturas interior e exterior, qual o intervalo predefinido de valores de humidade relativa interior (HR_{int}) em que efectivamente ocorrem condensações superficiais. Esses intervalos pretendem modelar de um modo simplificado os cenários definidos no Quadro 4.16.

Assim, e para a situação ilustrada na Figura 4.8, referente a uma configuração construtiva com um factor de temperatura $f_{0,25}$ igual a 0,57, conclui-se, analisando por exemplo o caso de um edifício situado no Porto durante o mês de Janeiro, assumindo uma temperatura média mensal exterior de 9 °C, que as condensações superficiais para condições de humidade interior compreendidas entre 50 e 70 % somente ocorreriam se um tal valor de humidade relativa coexistisse com uma temperatura interior de 22 °C, o que é francamente improvável (no caso de serem garantidas condições mínimas de ventilação).

Quadro 4.16 – Cenários de humidade relativa no interior de edifícios residenciais ⁱ⁾

Cenário	Intervalo	Descrição
Favorável	$HR_{int} < 50\%$	Edifício não sobreocupado e com caudais de ventilação adequados
Corrente	$50\% \leq HR_{int} \leq 70\%$	Edifício não sobreocupado mas com ventilação deficiente
Desfavorável	$HR_{int} > 70\%$	Edifício sobreocupado e com ventilação deficiente

i) Assumindo um valor de temperatura média interior compreendido entre 16 e 18 °C (que corresponderá à situação corrente dos edifícios residenciais em Portugal).

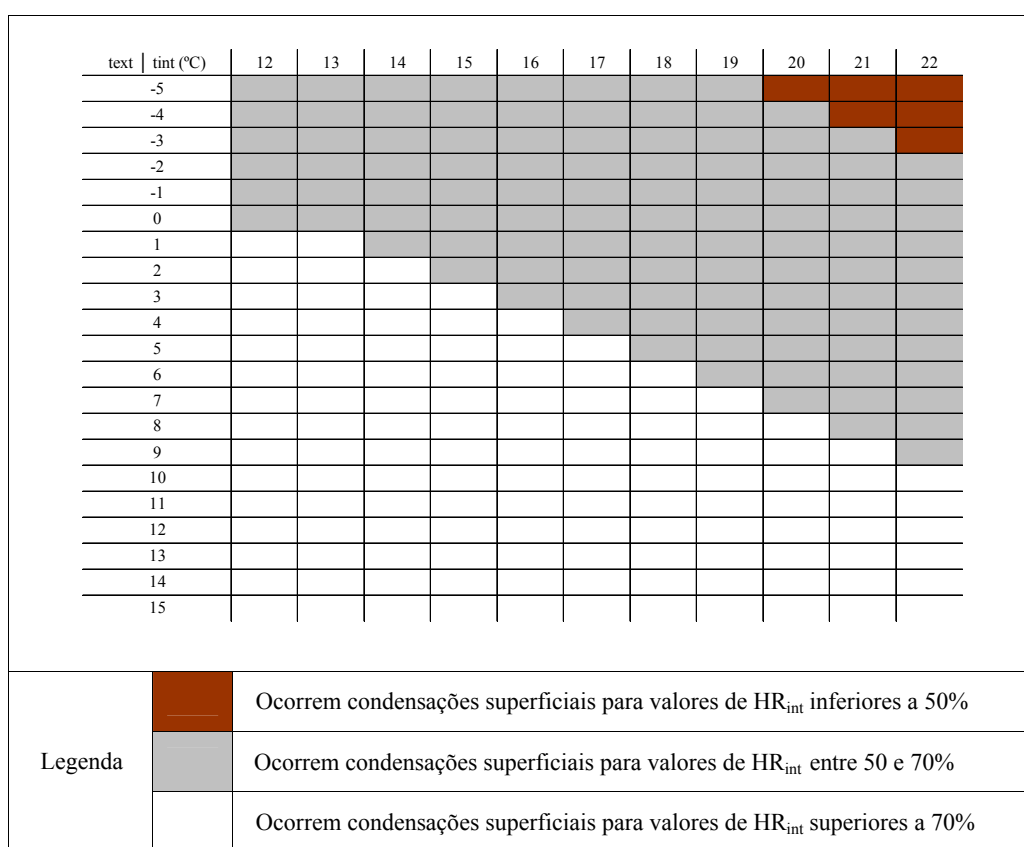


Figura 4.8 – Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais

Note-se que desta constatação não se poderá inferir que reduzir a temperatura interior seria neste caso um procedimento recomendável. Esta aparente contradição resulta da própria definição de humidade relativa, que expressa a quantidade de vapor de água que o ar contém sobre a quantidade máxima que o ar pode conter, para uma dada temperatura (normalmente expressa em percentagem). Ora quanto maior for a temperatura do ar, maior

será também a quantidade máxima de vapor de água que este poderá conter (maior valor de pressão de saturação). Logo, para a mesma humidade relativa o aumento da temperatura pressupõe um aumento da quantidade de vapor no interior que potencia o aparecimento de condensações superficiais pela elevação da temperatura de ponto de orvalho.

4.3.7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.7.1 EXEMPLO DE ANÁLISE – CONFIGURAÇÕES C1.1.x e C1.2.x

Os resultados obtidos para as configurações C1.1.3 e C1.1.8 (Anexo II) demonstram que, sob o ponto de vista da habitabilidade, para uma temperatura interior de 18 °C (admitindo uma variação de 2 °C relativamente ao valor de conforto preconizado habitualmente para edifícios residenciais na estação de aquecimento [27] [71]) somente para zonas frias (com valores médios de t_{ext} inferiores a 6 °C) seria exigível uma correcção de pontes térmicas para uma humidade relativa interior compreendida entre 50 e 70%.

Sob o ponto de vista da sustentabilidade, verifica-se que o acréscimo de perda de calor para o exterior é negligenciável para ambas as espessuras de material isolante térmico, não se justificando a correcção (classificação C1).

Para as configurações C1.2.3 e C1.2.8 os resultados obtidos evidenciam a necessidade de impedir a existência deste tipo de erros construtivos aquando de situações novas ou de reabilitação, já que resultam num desempenho térmico deficiente, justificando a correcção sob o ponto de vista quer da sustentabilidade, quer da habitabilidade para as zonas I2 e I3.

Do exemplo de análise apresentado antevê-se um possível critério de avaliação para os resultados obtidos no sentido da necessidade de correcção da ponte térmica.

Por conseguinte, entende-se que se justifica a correcção da ponte térmica para a vertente habitabilidade quando, para uma temperatura interior de 18 °C, ocorram condensações superficiais para valores de HR_{int} compreendidos entre 50 e 70%.

Quanto ao factor sustentabilidade, entende-se que a intervenção será prioritária consoante a classificação da ponte térmica seja igual a C4 (desenvolvimento na direcção vertical), ou igual ou superior a C3 (desenvolvimento na direcção horizontal). De acordo com a abordagem da regulamentação térmica nacional neste domínio [27] adoptou-se o sistema de dimensões interior (ψ_i) como referência para a aplicação deste critério.

Recorde-se que de acordo com [30], e tal como havia sido já referido no Capítulo 2, uma classificação C3 corresponde a um efeito potencial “elevado” ao passo que C4 corresponde a um efeito potencial “muito elevado”. Atendendo à diferença do comprimento das pontes térmicas ao nível do seu desenvolvimento (normalmente inferior na vertical), entendeu-se adequado efectuar esta distinção na análise dos resultados obtidos.

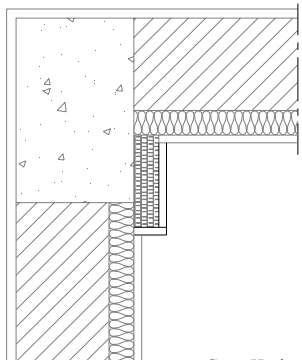
4.3.7.2 SÍNTESE DE RESULTADOS E PRINCÍPIOS DE CORRECÇÃO

Resumem-se nos Quadros 4.17 a 4.22 os principais resultados e conclusões resultantes das simulações efectuadas, bem como os respectivos princípios de correcção, seja numa perspectiva de reabilitação ou de construção nova. Relativamente aos princípios de correcção, e atendendo a que a temática foi já extensamente desenvolvida (particularmente para situações de reabilitação) num recente trabalho neste domínio [33], efectua-se uma descrição sucinta referente ao seu modo de resolução e eficácia, incluindo um pormenor-tipo desenhado, recomendando-se a consulta de [33] para um maior aprofundamento relativo à implementação tecnológica dos princípios de correcção propostos.

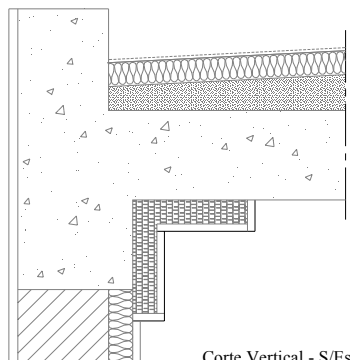
Como nota aplicável aos diversos esquemas de correcção propostos sublinhe-se que se recomenda que o material isolante térmico a utilizar seja tanto quanto possível (na prática) similar (ao nível da sua resistência térmica) ao proposto em zona construtiva corrente (parede exterior), recomendando-se em [33] um valor mínimo de 3 cm.

A análise dos Quadros 4.17 a 4.22 permite concluir que na generalidade das configurações construtivas se recomenda a implementação de estratégias de correcção, quer por razões de habitabilidade quer de sustentabilidade ambiental. As únicas configurações que poderão não ser corrigidas têm a designação 6.1.3 e 6.1.8 correspondendo à ligação entre uma parede exterior e uma parede interior sem pilar.

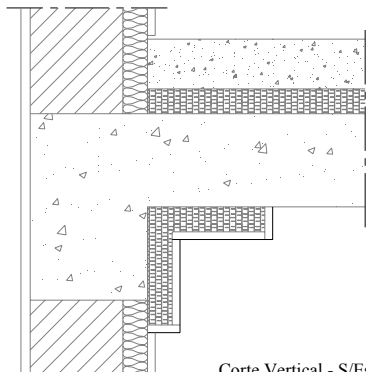
Quadro 4.17 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C1

Código		$f_{0,25}$ [-]	Ψ_i [W/(m ² ·°C)]	Ψ_e [W/(m ² ·°C)]	Necessidade de Correcção
C1	1.1.3	0,56	0,09	-0,27	Fundamental – Habitabilidade, zona I3
	1.1.8	0,58	0,09	-0,14	
	1.2.3	0,42	0,31	-0,04	Fundamental – Habitabilidade, zonas I2 e I3
	1.2.8	0,43	0,36	0,12	Desejável – Habitabilidade, zona I1 Desejável – Sustentabilidade
Princípio Correcção		<p>Prolongamento do material isolante térmico no encontro das duas paredes exteriores.</p> <p>Valor $f_{0,25} > 0,70$</p> <p>Valor $\Psi_i < 0,10$</p> <p>Valor $\Psi_e < 0$</p>			 <p>Corte Horizontal - S/Esc.</p>

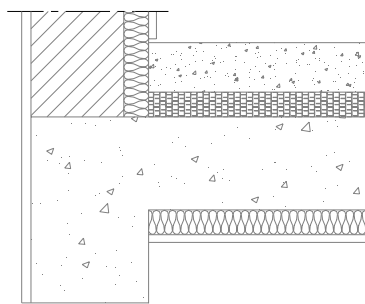
Quadro 4.18 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C2

Código		$f_{0,25}$ [-]	Ψ_i [W/(m ² ·°C)]	Ψ_e [W/(m ² ·°C)]	Necessidade de Correcção
C2	2.1.3	0,60	0,43	0,06	Desejável – Habitabilidade, zona I3
	2.1.8	0,63	0,48	0,24	Fundamental – Sustentabilidade
	2.2.3	0,58	0,47	0,10	Fundamental – Habitabilidade, zona I3
	2.2.8	0,62	0,50	0,26	Fundamental – Sustentabilidade
Princípio Correcção		<p>Colocação de material isolante térmico na face inferior da laje de cobertura num comprimento entre 50-75 cm e prolongamento ao longo da viga, disfarçado com um tecto falso ou uma sanca decorativa.</p> <p>Valor $f_{0,25} > 0,70$</p> <p>Valor $\Psi_i < 0,20$</p> <p>Valor $\Psi_e < 0$</p>			 <p>Corte Vertical - S/Esc.</p>

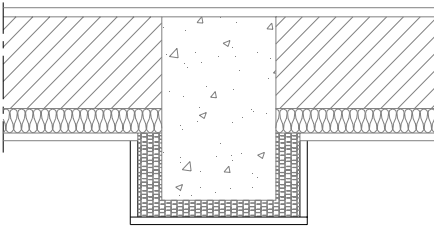
Quadro 4.19 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C3

Código		$f_{0,25}$ [-]	Ψ_i [W/(m ² ·°C)]	Ψ_e [W/(m ² ·°C)]	Necessidade de Correção
C3	3.1.3	0,65	0,79	0,56	Fundamental – Sustentabilidade (aplicação do critério para $\Psi/2$)
	3.1.8	0,68	0,75	0,63	
	3.2.3	0,63	0,89	0,66	Desejável – Habitabilidade, zona I3
	3.2.8	0,67	0,82	0,69	Fundamental – Sustentabilidade (aplicação do critério para $\Psi/2$)
Princípio Correção		<p>Sobre a laje, colocação de material isolante térmico sob o revestimento do pavimento (ou sob uma laje de inércia p.e. para isolamento sonoro a ruídos aéreos e de percussão).</p> <p>Sob a laje, tecto falso ou sanca com um material isolante térmico num comprimento de 25-50cm.</p> <p>Valor $f_{0,25} > 0,70$</p> <p>Valor $\Psi_i < 0,50$</p> <p>Valor $\Psi_e < 0,35$</p>			 <p>Corte Vertical - S/Esc.</p>

Quadro 4.20 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C4

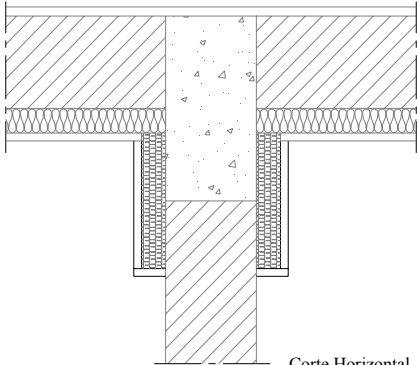
Código		$f_{0,25}$ [-]	Ψ_i [W/(m ² ·°C)]	Ψ_e [W/(m ² ·°C)]	Necessidade de Correção
C4	4.1.3	0,57	0,41	0,01	Fundamental – Habitabilidade, zona I3
	4.1.8	0,61	0,48	0,21	Fundamental – Sustentabilidade
	4.2.3	0,56	0,44	0,04	Fundamental – Habitabilidade, zona I3
	4.2.8	0,59	0,52	0,26	Fundamental – Sustentabilidade
Princípio Correção		<p>Sobre a laje, colocação de um material isolante térmico sob o revestimento do pavimento, ou sob a camada de enchimento.</p> <p>Valor $f_{0,25} > 0,70$</p> <p>Valor $\Psi_i < 0,20$</p> <p>Valor $\Psi_e < 0$</p>			 <p>Corte Vertical - S/Esc.</p>

Quadro 4.21 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C5

Código		$f_{0,25}$ [-]	Ψ_i [W/(m ² ·°C)]	Ψ_e [W/(m ² ·°C)]	Necessidade de Correção
C5	5.1.3	0,53	0,36	0,36	Fundamental – Habitabilidade, zona I3 Desejável – Habitabilidade, zona I2 Fundamental – Sustentabilidade
	5.1.8	0,54	0,43	0,43	
	5.2.3	0,65	0,49	0,49	Fundamental – Sustentabilidade
	5.2.8	0,67	0,55	0,55	
Princípio Correção		Continuidade do material isolante térmico ao longo da parede exterior contornando o pilar estrutural. Valor $f_{0,25} > 0,70$ Valor $\Psi_i < 0,15$ Valor $\Psi_e < 0,15$			 <p>Corte Horizontal - S/Esc.</p>

Quadro 4.22 – Resultados e princípios de correcção decorrentes da avaliação de pontes térmicas para a configuração construtiva C6

Código		$f_{0,25}$ [-]	Ψ_i [W/(m ² ·°C)]	Ψ_e [W/(m ² ·°C)]	Necessidade de Correção
C6	6.1.3	0,75	0,22	0,08	Sem necessidade de correcção (critério de sustentabilidade aplicado para $\Psi/2$)
	6.1.8	0,78	0,29	0,21	
	6.2.3	0,63	0,42	0,28	Desejável – Habitabilidade, zona I3 (critério de sustentabilidade aplicado para $\Psi/2$)
	6.2.8	0,65	0,39	0,31	
	6.3.3	0,66	0,52	0,38	Desejável – Sustentabilidade (aplicação do critério para $\Psi/2$)
	6.3.8	0,68	0,59	0,51	

Código	$f_{0,25}$ [-]	ψ_i [W/(m ² ·°C)]	ψ_e [W/(m ² ·°C)]	Necessidade de Correção
Princípio Correção	<p>Prolongamento do material isolante térmico ao longo da parede interior num comprimento no mínimo igual ao do pilar</p> <p>Valor $f_{0,25} > 0,70$</p> <p>Valor $\psi_i < 0,45$</p> <p>Valor $\psi_e < 0,35$</p>			 <p>Corte Horizontal - S/Esc.</p>

No caso do critério de habitabilidade verifica-se que a zona climática I3 é particularmente problemática, sendo recomendável a correção para todas as situações estudadas com a (eventual) exceção das configurações C3 e C6, ao invés da zona climática I1 para a qual somente as configurações C1.2.3 e C1.2.8 são passíveis de correção.

Já quanto à vertente de sustentabilidade ambiental, as configurações C1.1.3, C1.1.8, C6.1.3, C6.1.8, C6.2.3 e C6.2.8 não justificam uma intervenção de correção, embora esta possa ser igualmente rejeitada no caso das configurações C6.3.3 e C6.3.8.

Os valores simulados para os parâmetros descritores permitem concluir ser viável a introdução da tecnologia de isolamento térmico pelo interior em edifícios do segmento residencial ao nível das consequências da ocorrência de pontes térmicas, particularmente na vertente habitabilidade, para a qual se demonstra não existir um risco significativo de condensações superficiais, desde que sejam garantidas condições de ventilação e aquecimento adequadas e implementadas as estratégias de correção propostas (sobretudo para as configurações C1, C2, C4 e C5).

Note-se que no caso das configurações C1 e C5, mais do que um princípio de correção, trata-se de evitar um potencial erro construtivo, visto ser suficiente o prolongamento do material isolante térmico ao longo da descontinuidade originada pelo elemento estrutural.

Saliente-se ainda que o problema associado ao acréscimo de perda térmica para o exterior pode ser minimizado aumentando ligeiramente a espessura do material isolante térmico em zona corrente face aos critérios utilizados (neste caso com base em. [18]). No entanto, e atendendo aos resultados obtidos com as estratégias de correcção propostas, esta acção não se justificará para situações correntes onde aquelas sejam correctamente implementadas.

Finalmente apresentam-se dois pormenores construtivos relativos à ligação entre o sistema de isolamento térmico pelo interior com uma caixilharia exterior (Figuras 4.9 e 4.10), e com uma caixa de estore (Figura 4.11), cujo princípio de aplicação permite na prática desprezar o efeito das pontes térmicas nestas situações [27].

Refira-se que se tratam de esquemas conceptuais que deverão ser devidamente adaptados às condições efectivas de uma dada situação concreta.

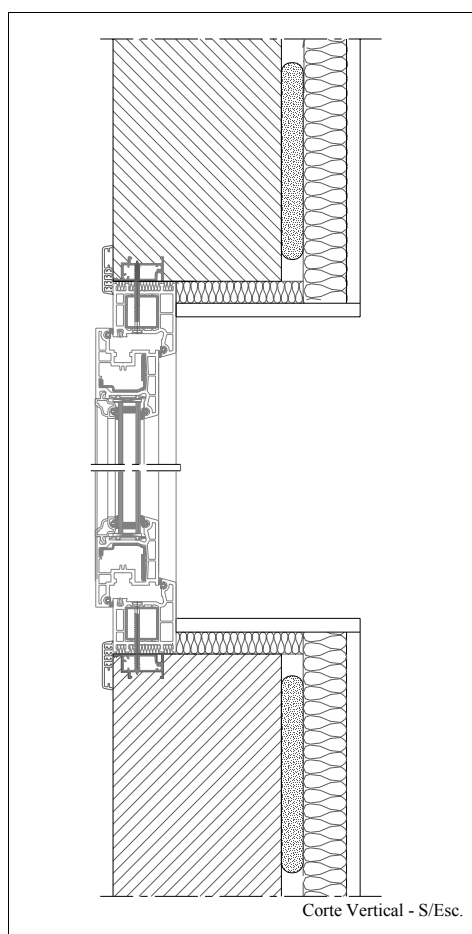


Figura 4.9 – Pormenor de ligação entre o sistema de isolamento térmico pelo interior e a caixilharia (corte vertical)

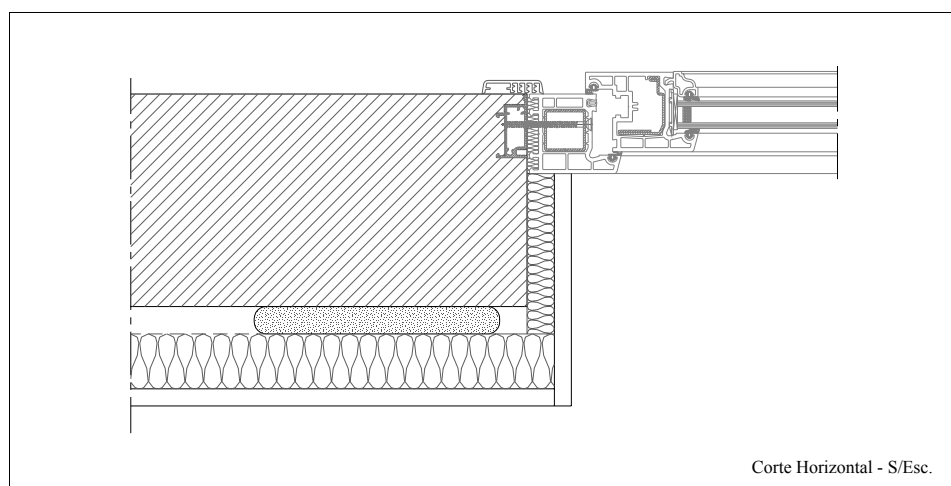


Figura 4.10 – Pormenor de ligação entre o sistema de isolamento térmico pelo interior e a caixilharia (corte horizontal)

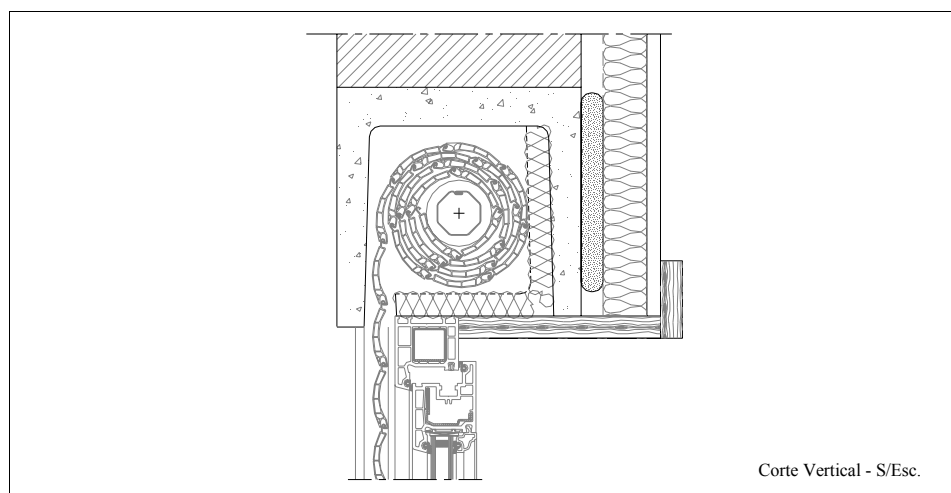


Figura 4.11 – Pormenor de ligação entre o sistema de isolamento térmico pelo interior e a caixa de estore (corte vertical)

4.4 VARIAÇÕES DE TEMPERATURA

4.4.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

Como é conhecido [74] as variações de temperatura provocam a dilatação e contracção das paredes e dos elementos estruturais, potenciando a geração de tensões significativas, não apenas no seio dos elementos construtivos, mas igualmente nas ligações entre eles, em consequência dos diferentes coeficientes de dilatação térmica linear dos materiais, podendo ser responsáveis por patologias quer ao nível da alvenaria quer do revestimento, mais comumente fissurações cuja magnitude pode afectar, para além do efeito estético ao nível do revestimento, a própria estanquidade das fachadas.

O mesmo autor exemplifica com o facto do betão e a argamassa possuírem um coeficiente de dilatação térmica linear superior ao dobro do valor do tijolo cerâmico corrente, provocando, face a uma variação de temperatura, tendências de expansão e contracção distintas entre materiais confinantes. Por exemplo, um pano de alvenaria não estrutural inserido numa estrutura porticada de betão armado sujeito a variações de temperatura, provoca tensões nas ligações à estrutura que são frequentemente responsáveis pela fissuração do revestimento exterior. As próprias ligações entre os tijolos e a argamassa de assentamento podem pelas mesmas razões ser sujeitas a elevados esforços de corte.

Para o estudo deste fenómeno desenvolveram-se um conjunto de simulações conducentes à obtenção de perfis de temperatura diários, numa base horária, instalados numa parede de alvenaria, considerando como elemento construtivo de base a mesma solução já utilizada nos pontos anteriores (parede de alvenaria de tijolo furado de 22 cm), fazendo variar um conjunto de parâmetros entendidos relevantes, a saber:

- Condições climáticas exteriores – estação do ano;
- Orientação da parede (assumiu-se um elemento totalmente vertical);
- Coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior;
- Espessura do material isolante térmico adoptado.

Pretende-se assim analisar o potencial efeito pernicioso das variações de temperatura em paredes de alvenaria não estruturais associado à utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior, designadamente quando comparado com o sistema exterior, que se sabe ser teoricamente mais favorável.

Refira-se ainda no âmbito desta temática a probabilidade de ocorrência do denominado fenómeno de choque térmico, que corresponde a uma variação súbita da temperatura instalada na parede exterior (ex. ocorrência de precipitação num dia de Verão de elevada radiação solar em que a parede atinge temperaturas significativas), passível de provocar contracções muito significativas. A análise desenvolvida neste ponto não pretende focar este fenómeno em particular, cingindo-se às solicitações decorrentes da variação da temperatura e radiação solar exteriores. Alerta-se somente para a probabilidade da sua ocorrência como uma situação limite da variação da temperatura da parede exterior.

4.4.2 METODOLOGIA

Para a determinação dos perfis de temperatura instalados na parede exterior recorreu-se a um programa de cálculo automático designado “CONDUC”, desenvolvido e validado por Corvacho no âmbito do seu trabalho de doutoramento [32], tendo por base o método das diferenças finitas e permitindo a simulação em regime permanente ou variável.

Para a sua utilização é necessária a definição de uma malha geométrica representativa do elemento construtivo, como se exemplifica na Figura 4.12 para o caso de uma parede de alvenaria de tijolo cerâmico furado de 22 cm com 3 cm de material isolante térmico, incluindo n.º de linhas, o n.º de colunas e as respectivas dimensões relativas.

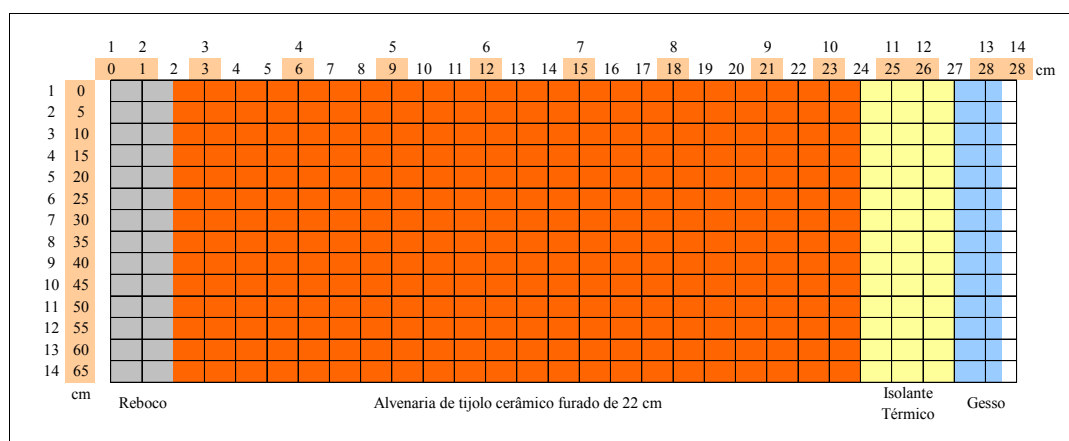


Figura 4.12 – Definição da malha representativa do elemento construtivo em estudo

A caracterização dos materiais que constituem o elemento construtivo no programa é efectuada através das seguintes propriedades (definidas no Anexo 1):

- Coeficiente de condutibilidade térmica;
- Calor específico;
- Massa volúmica aparente.

A definição das condições de fronteira no programa faz-se mediante a especificação das variáveis temperatura ambiente e condutância térmica superficial, exteriores e interiores.

No que respeita à condutância térmica superficial utilizaram-se os valores de 25 W/(m²·°C) para o exterior e de 7,7 W/(m²·°C) para o interior [73].

Relativamente às variáveis temperatura, o seu valor interior foi tomado como constante igual a 20 °C, tendo os valores exteriores sido retirados da base de dados de recolhas meteorológicas do Laboratório de Física de Construções (LFC) da FEUP. De modo a simular com o programa supracitado o efeito da radiação solar incidente na parede exterior recorreu-se ao conceito de “temperatura fictícia ar-sol” (Equação 4.4) tendo igualmente por base valores de radiação provenientes da base de dados do LFC.

$$t_{\text{ar-sol}} = t_e + \frac{\alpha R}{h_e} \quad (4.4)$$

Sendo:

$t_{\text{ar-sol}}$ – temperatura fictícia ar-sol, [°C];

t_e – temperatura ambiente exterior, [°C];

α – coeficiente de absorção da radiação solar, [-];

R – radiação solar global incidente, [W/m²];

h_e – condutância térmica superficial exterior, [W/(m²·°C)].

Quanto ao coeficiente de absorção solar, o seu valor varia sobretudo em função da cor do revestimento exterior da envolvente, informação sintetizada no Quadro 4.23.

Quadro 4.23 – Coeficiente de absorção solar em função da cor do revestimento exterior [8]

Cor	Branco	Amarelo Laranja Vermelho claro	Vermelho escuro Verde claro Azul claro	Castanho Verde escuro Azul vivo Azul escuro	Castanho escuro Preto
Coeficiente de absorção solar α	0,2-0,3	0,3-0,5	0,5-0,7	0,7-0,9	0,9-1,0

Importa ainda esclarecer que, atendendo à temática em questão, ao teor mais orientativo das conclusões pretendidas, e a uma maior facilidade na sua transposição para cenários climáticos distintos comparativamente com os aspectos focados nos pontos anteriores, se limitou a análise desenvolvida à cidade do Porto.

4.4.3 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS EXTERIORES DE REFERÊNCIA

As condições climáticas exteriores de referência correspondem à temperatura ambiente exterior e à radiação solar global incidente. Em face da informação disponibilizada pelo LFC foram seleccionados dois dias de referência representativos de condições climáticas extremas, atendendo às duas perspectivas de análise contempladas neste ponto:

- Amplitude térmica máxima diária;
- Amplitude térmica máxima anual.

Apresentam-se seguidamente os valores de radiação solar global incidente num plano vertical para as diversas orientações, bem como as temperaturas ambiente exterior e ar-sol (Figuras 4.13 a 4.18), referentes aos dois dias seleccionados.

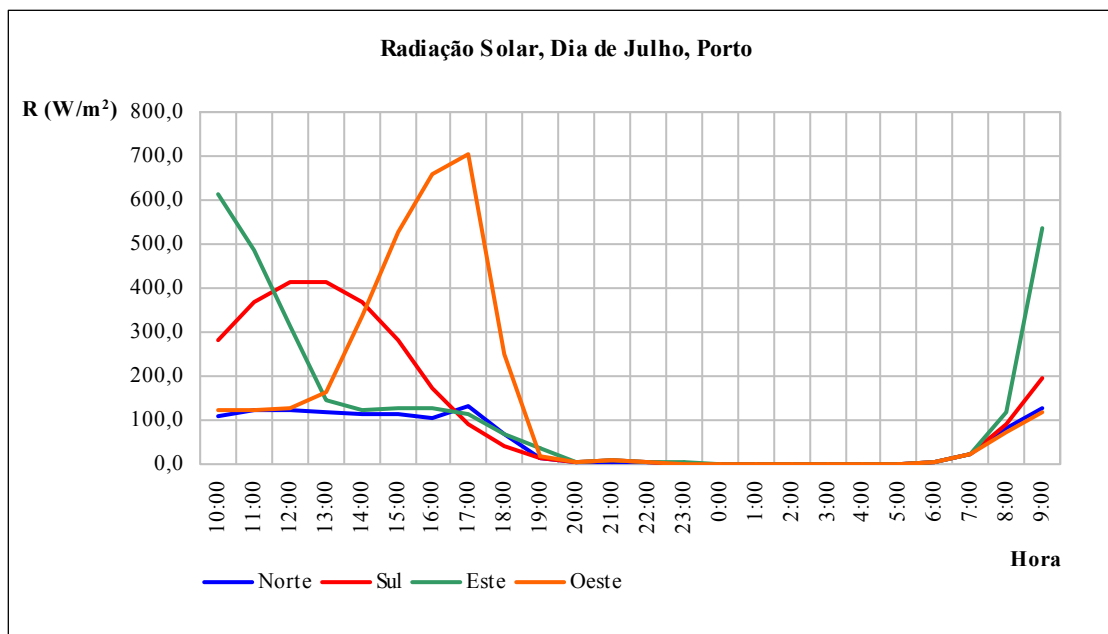


Figura 4.13 – Dados de radiação solar global [W/m^2] incidente num plano vertical para orientações distintas, num dia de Julho, na cidade do Porto

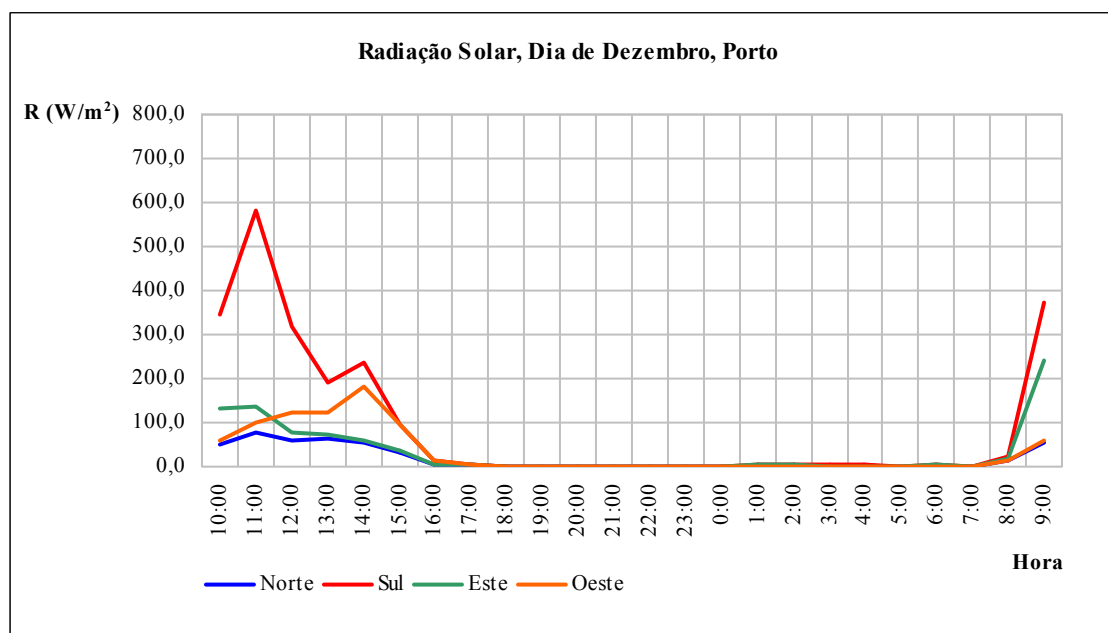


Figura 4.14 – Dados de radiação solar global [W/m^2] incidente num plano vertical para orientações distintas, num dia de Dezembro, na cidade do Porto

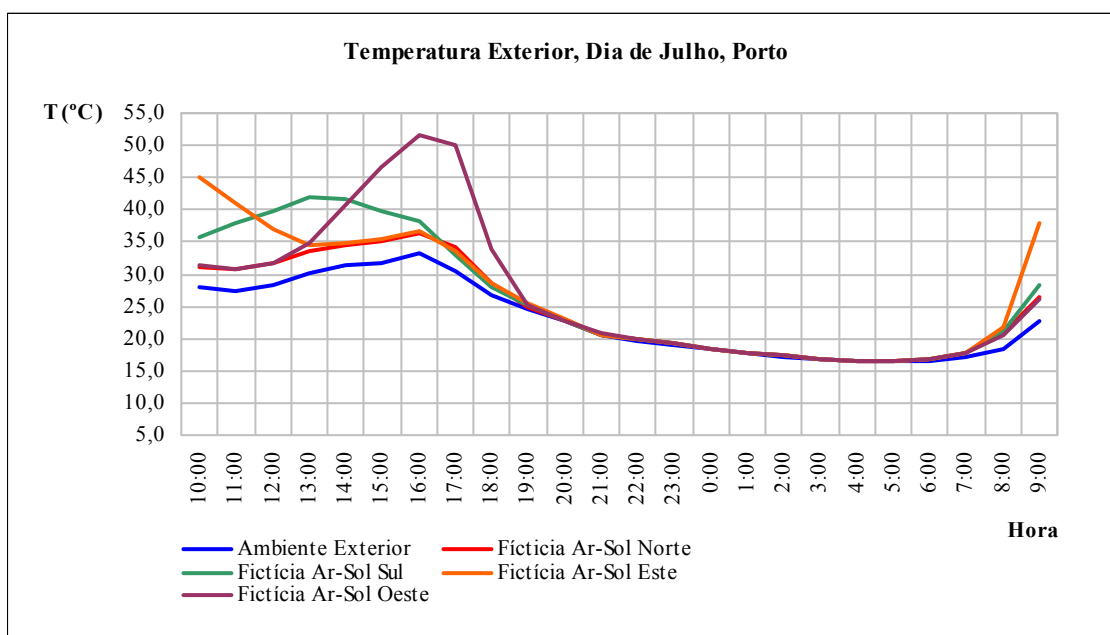


Figura 4.15 – Valores de temperatura exterior [°C], ambiente e fictícia ar-sol, num elemento vertical com diferentes orientações, para um dia de Julho, na cidade do Porto, considerando um valor de $\alpha = 0,70$

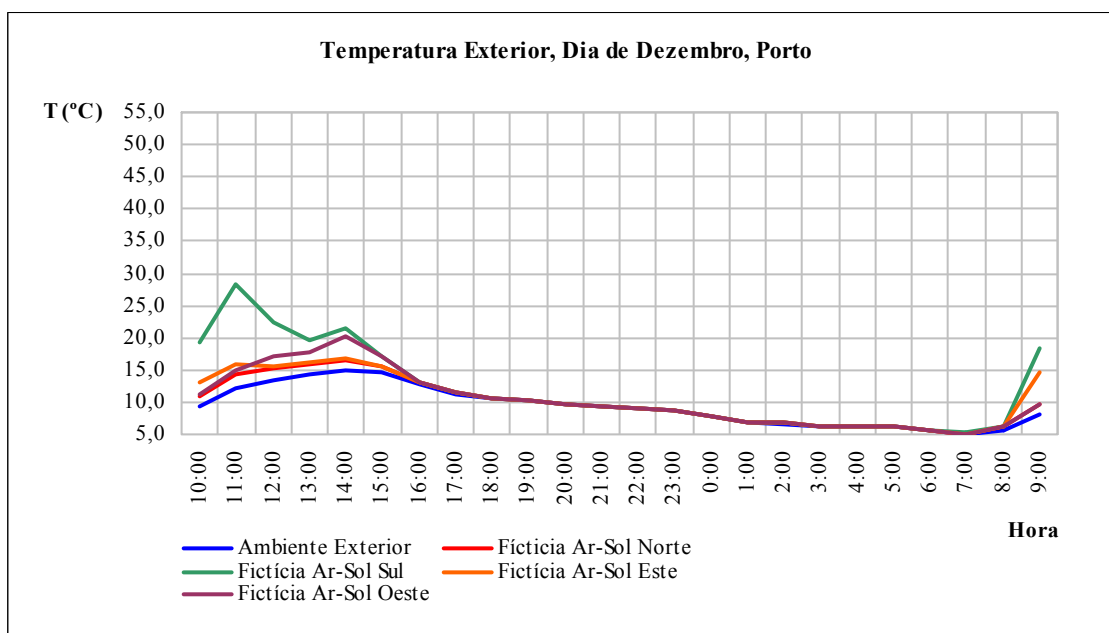


Figura 4.16 – Valores de temperatura exterior [°C], ambiente e fictícia ar-sol, num elemento vertical com diferentes orientações, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, considerando um valor de $\alpha = 0,70$

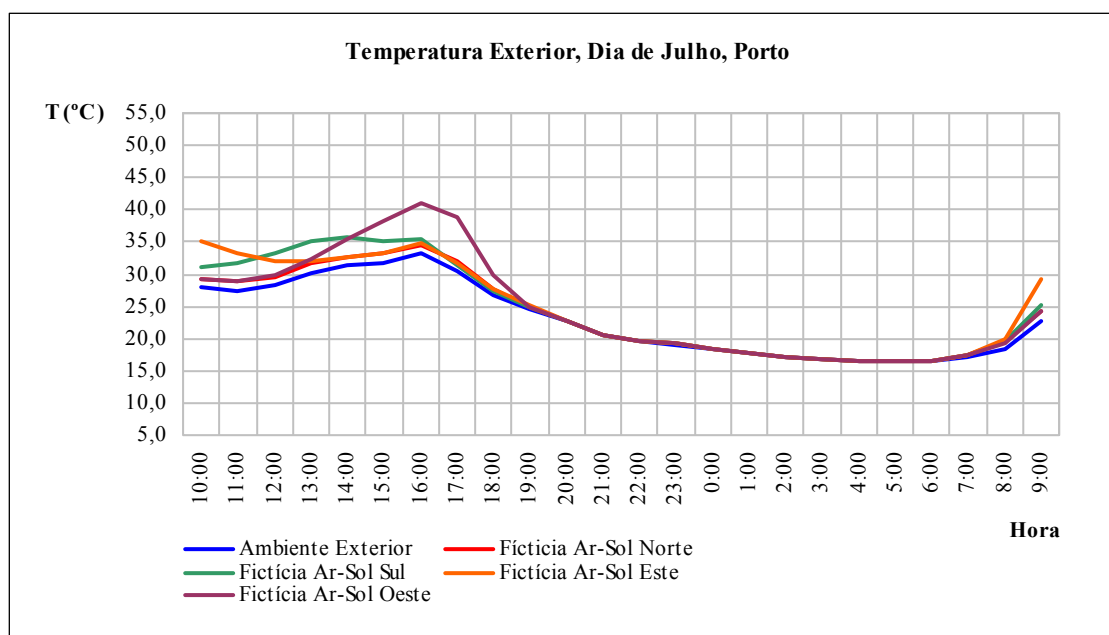


Figura 4.17 – Valores de temperatura exterior [$^{\circ}\text{C}$], ambiente e fictícia ar-sol, num elemento vertical com diferentes orientações, para um dia de Julho, na cidade do Porto, considerando um valor de $\alpha = 0,30$

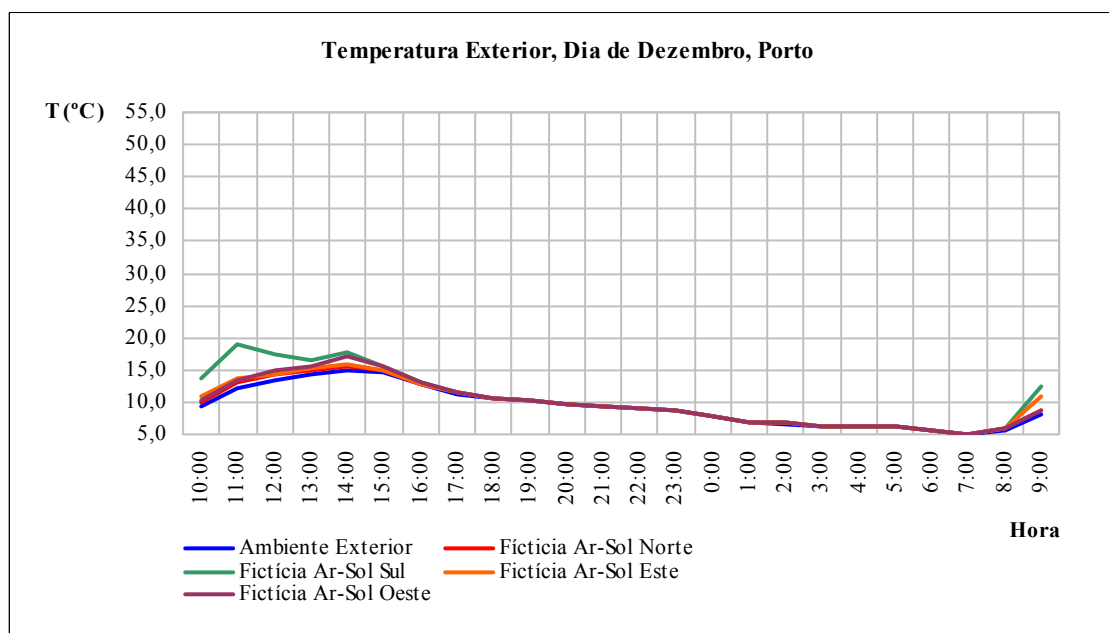


Figura 4.18 – Valores de temperatura exterior [$^{\circ}\text{C}$], ambiente e fictícia ar-sol, num elemento vertical com diferentes orientações, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, considerando um valor de $\alpha = 0,30$

4.4.4 ELEMENTO CONSTRUTIVO DE REFERÊNCIA

Optou-se pela consideração de um elemento similar ao utilizado nas simulações relativas às pontes térmicas (sem caixa de ar livre), adoptando novamente para a espessura do material isolante térmico os dois valores extremos de 3 cm e 8 cm. Note-se que sendo relevante para a análise desenvolvida neste ponto a comparação entre os sistemas interior e exterior, entendeu-se recorrer a um segundo elemento de referência análogo ao adoptado para o sistema interior, com a excepção da posição relativa do material isolante térmico (neste caso exterior à alvenaria).

4.4.5 SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO

Apresentam-se seguidamente um conjunto de gráficos ilustrativos dos principais resultados obtidos (Figuras 4.19 a 4.34). Saliente-se o destaque conferido à alvenaria de tijolo através da introdução de duas barras verticais e um sombreado de forma a facilitar a identificação da sua posição relativa no elemento construtivo.

Os resultados encontram-se divididos em duas secções distintas:

- Condições climáticas de Verão;
- Condições climáticas de Inverno.

Esclareça-se que face às inúmeras hipóteses de simulação combinando os diversos factores em análise – orientação da fachada, espessura do material isolante térmico e coeficiente de absorção solar – se apresentam unicamente os resultados que permitem obter conclusões relevantes atentando ao objectivo deste subcapítulo no conjunto do trabalho desenvolvido.

Este último comentário aplica-se particularmente ao caso das simulações desenvolvidas para as condições climáticas de Inverno, nas quais foram já tomados como referência os resultados obtidos para uma solicitação típica de um dia de Verão.

4.4.5.1 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE VERÃO

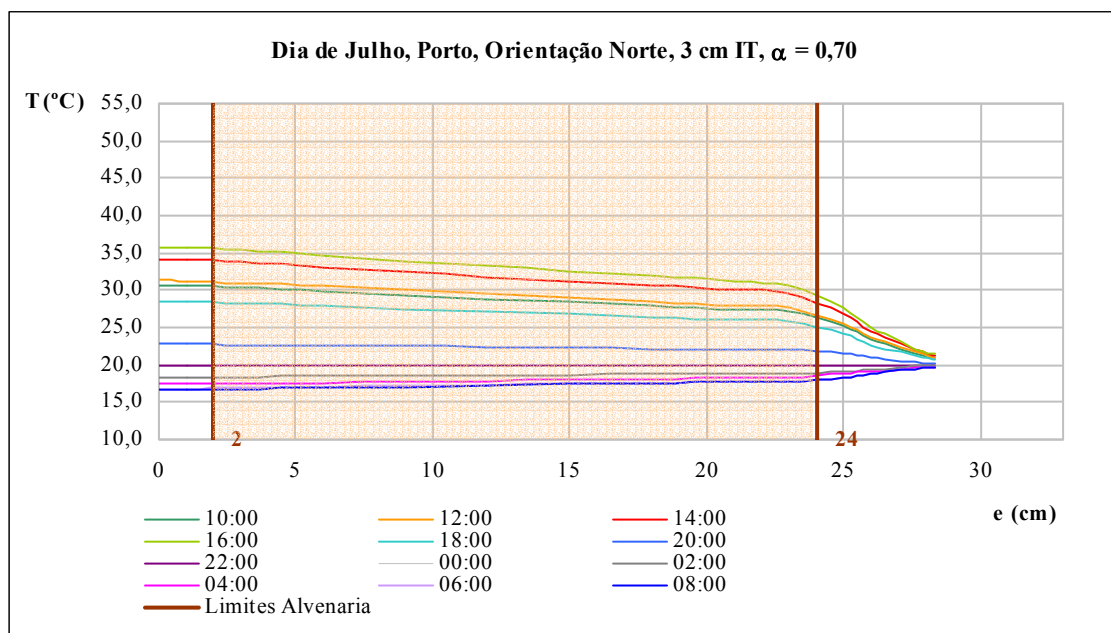


Figura 4.19 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Norte, considerando uma espessura de isolante térmico de 3 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

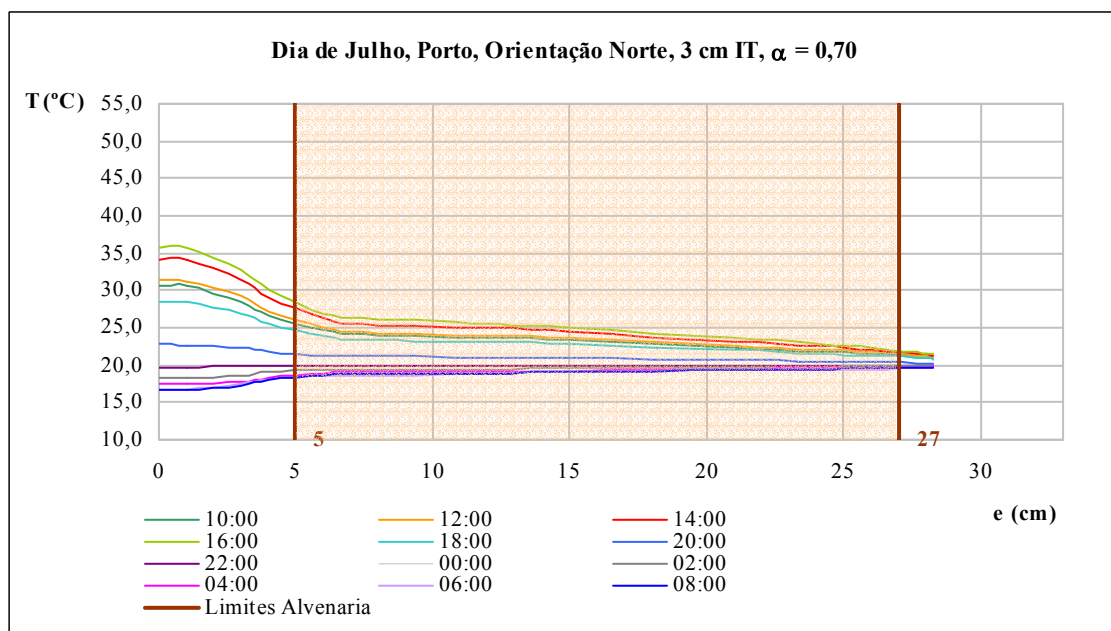


Figura 4.20 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Norte, considerando uma espessura de isolante térmico de 3 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

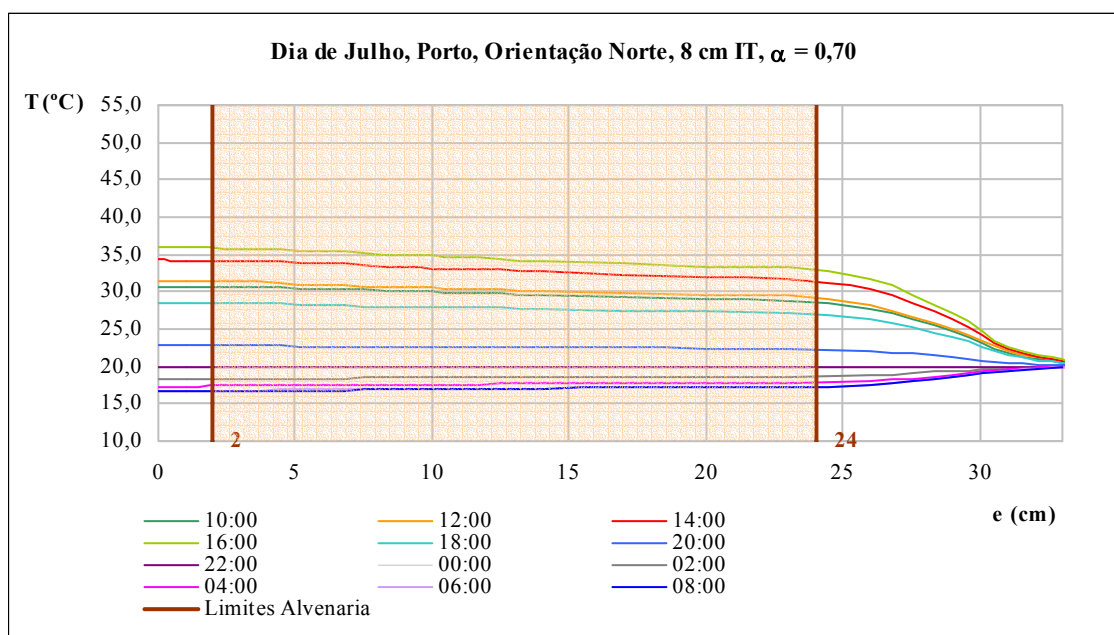


Figura 4.21 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Norte, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

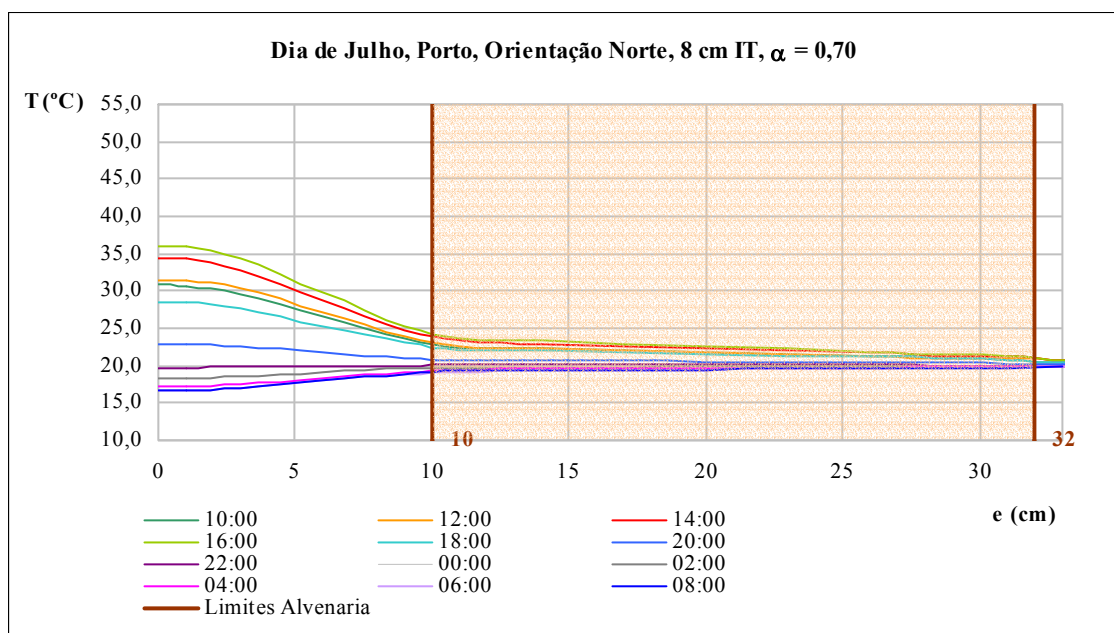


Figura 4.22 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Norte, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

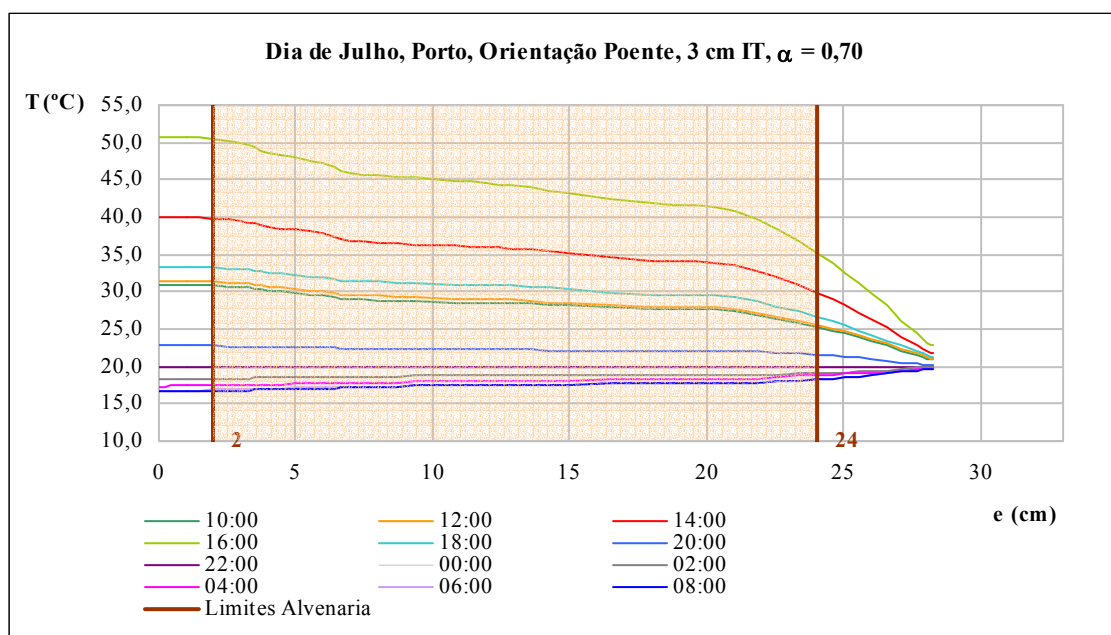


Figura 4.23 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 3 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

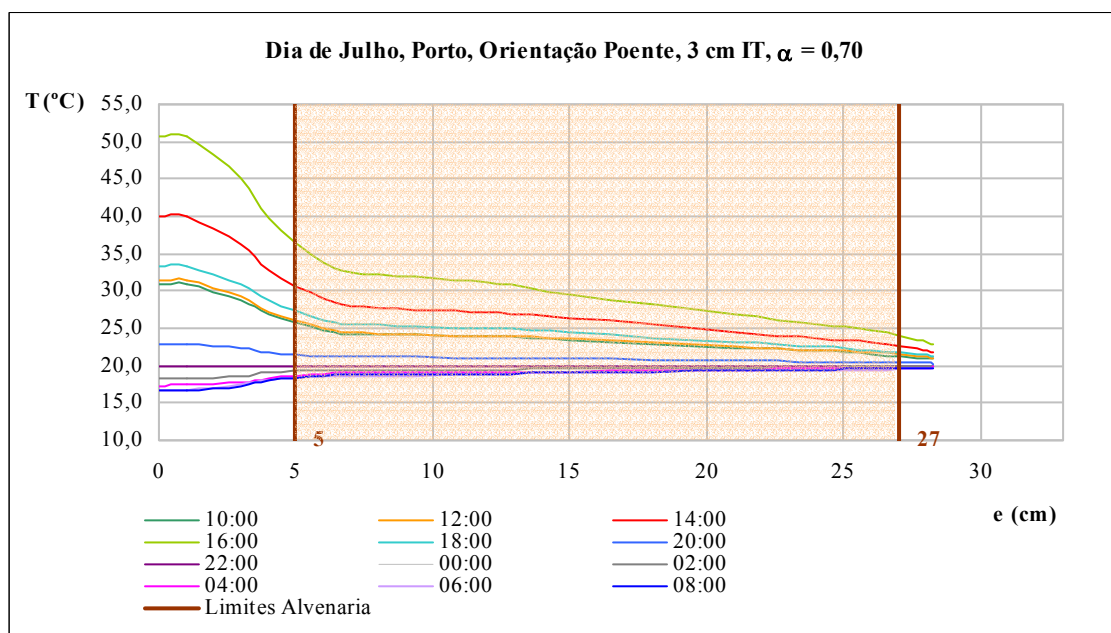


Figura 4.24 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 3 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

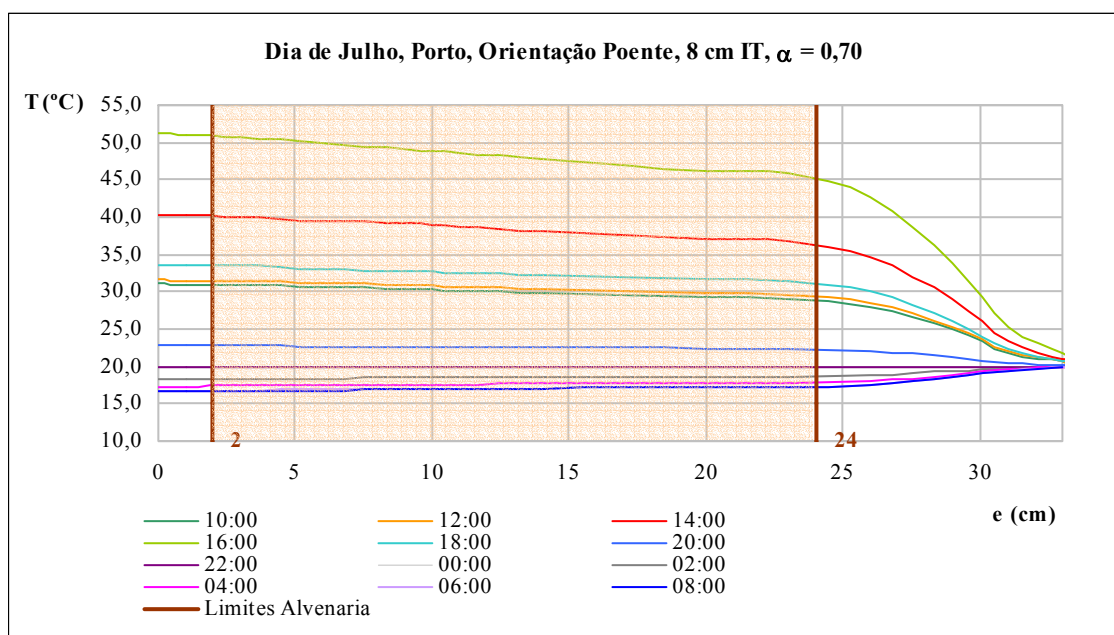


Figura 4.25 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

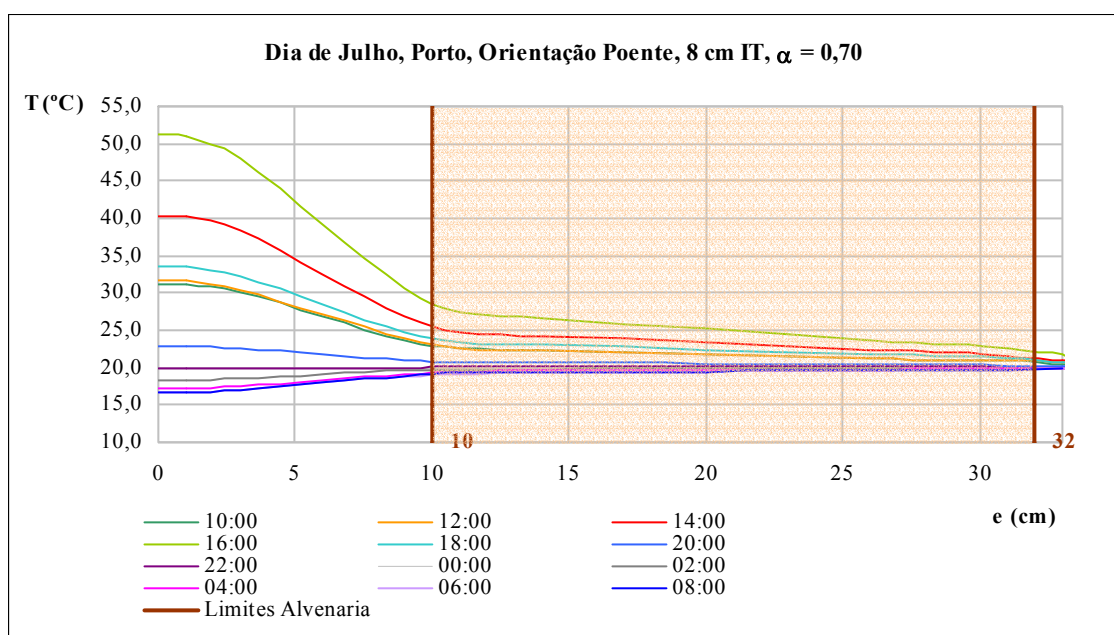


Figura 4.26 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

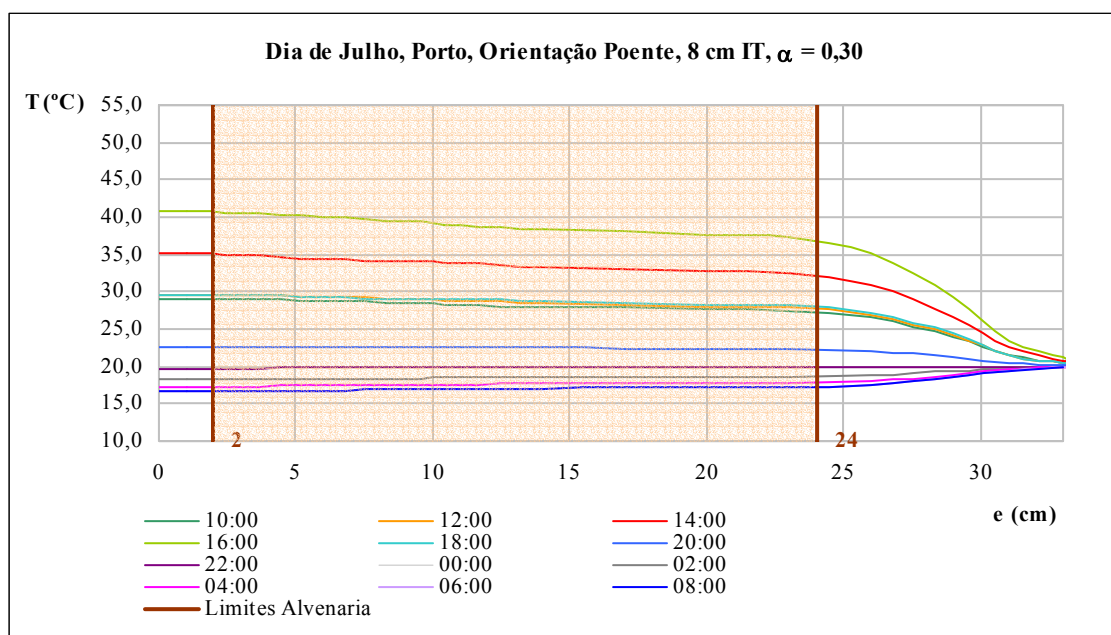


Figura 4.27 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,30$

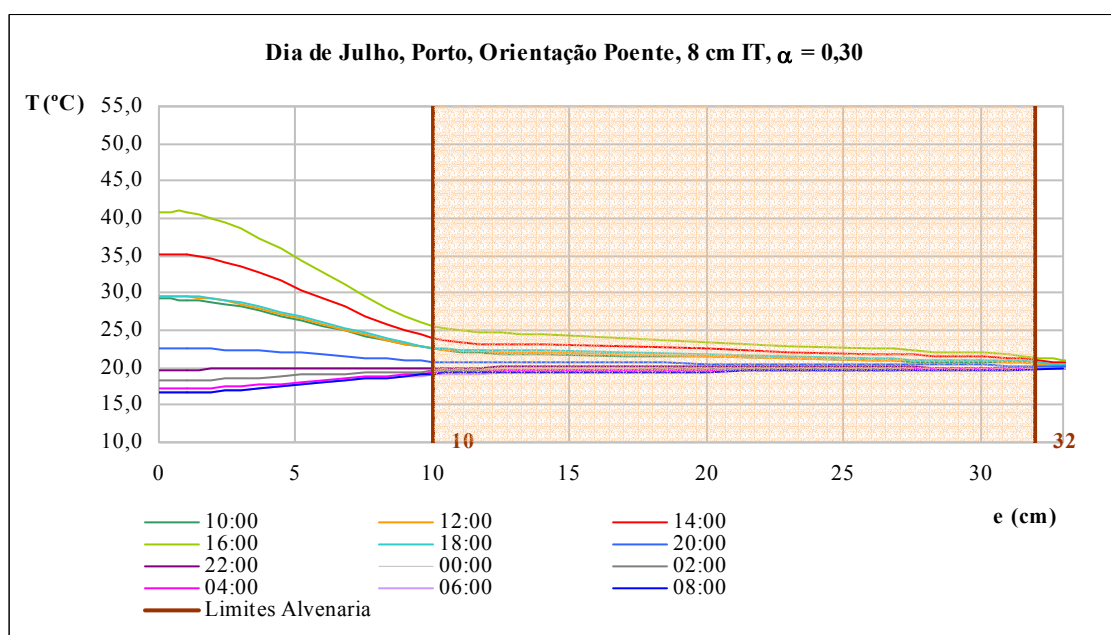


Figura 4.28 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Julho, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,30$

4.4.5.2 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE INVERNO

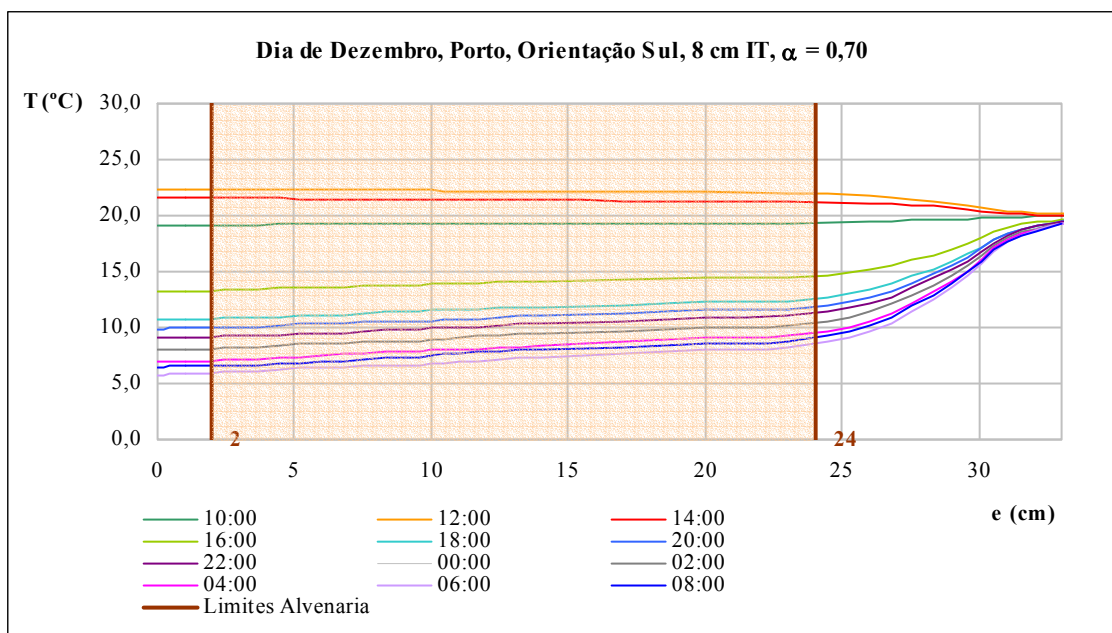


Figura 4.29 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Sul, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

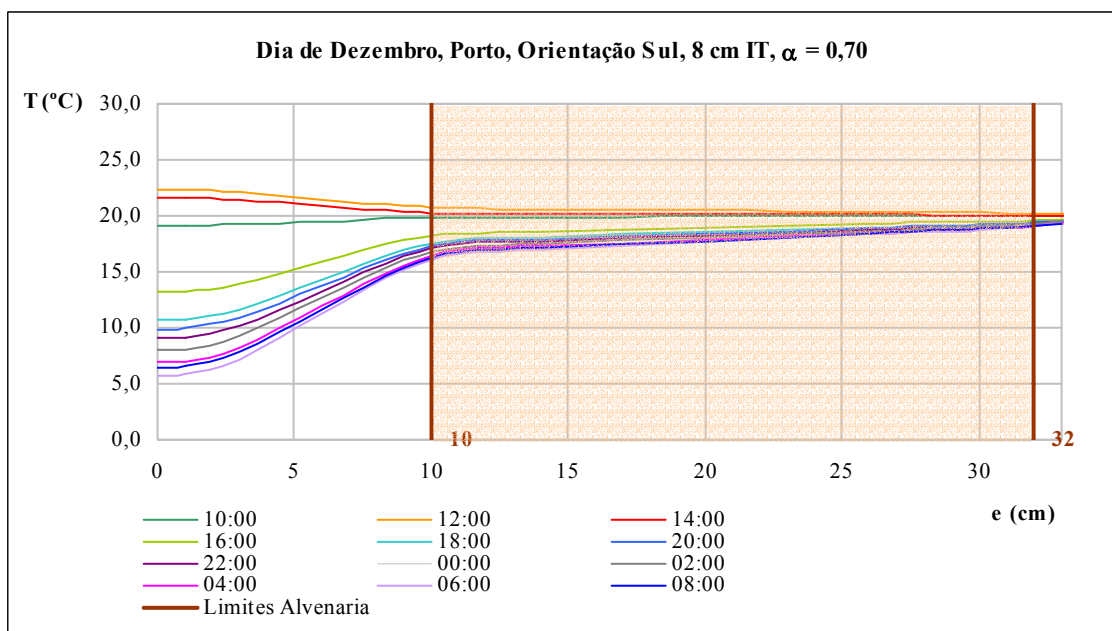


Figura 4.30 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Sul, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

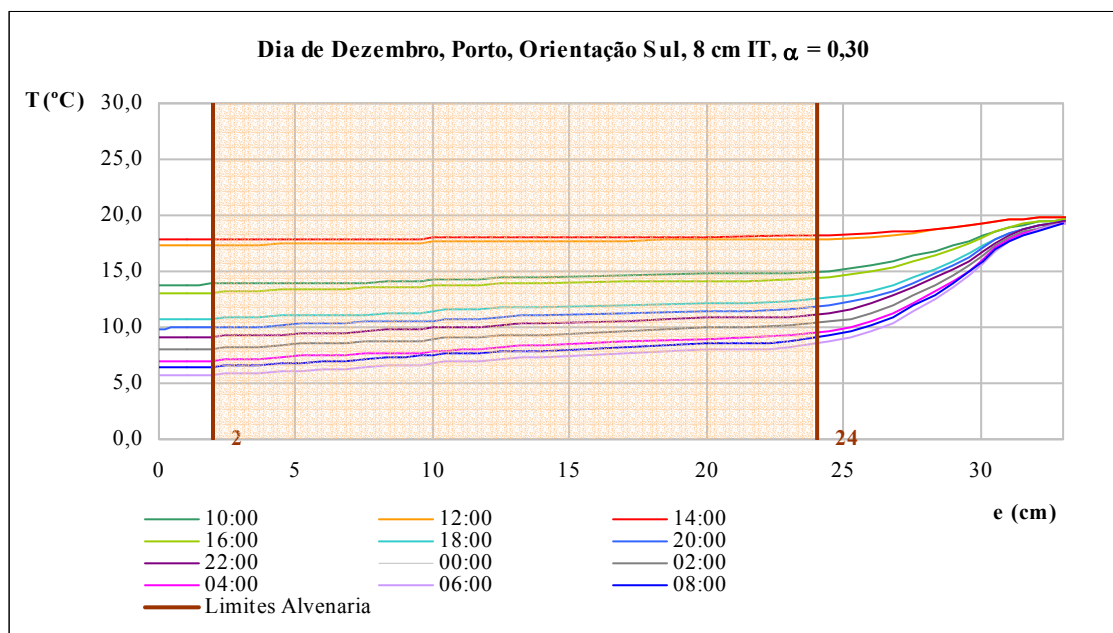


Figura 4.31 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Sul, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,30$

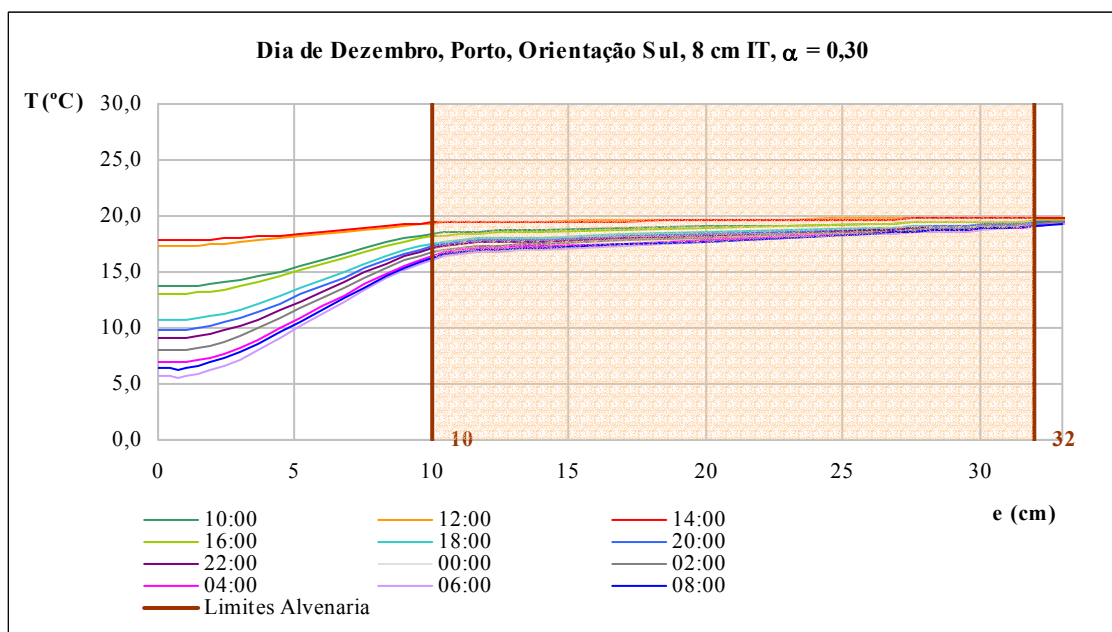


Figura 4.32 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Sul, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,30$

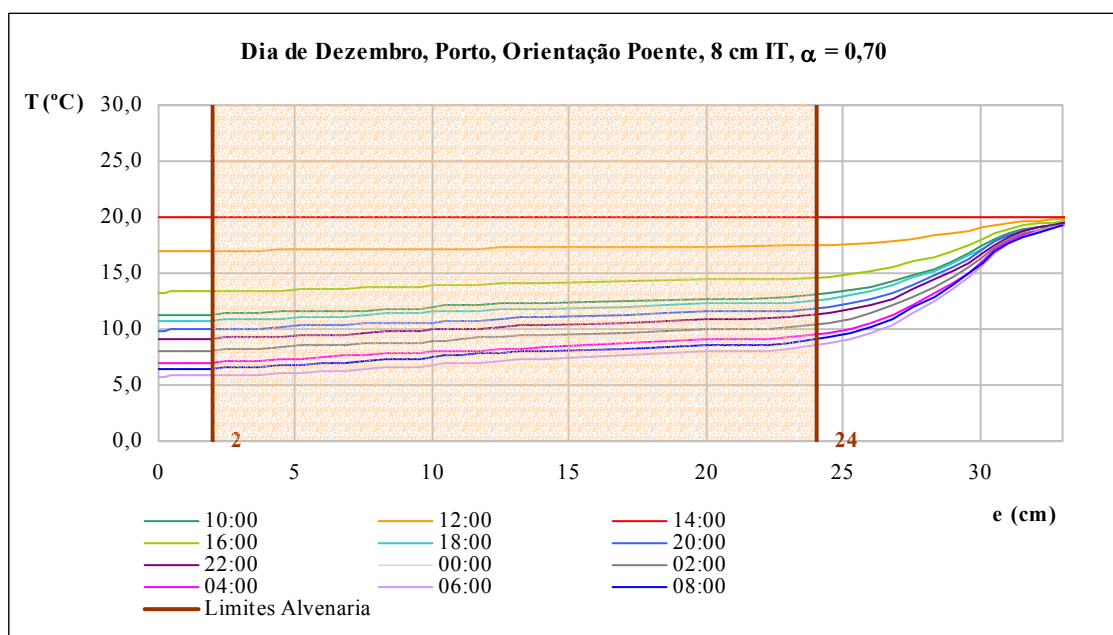


Figura 4.33 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo interior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

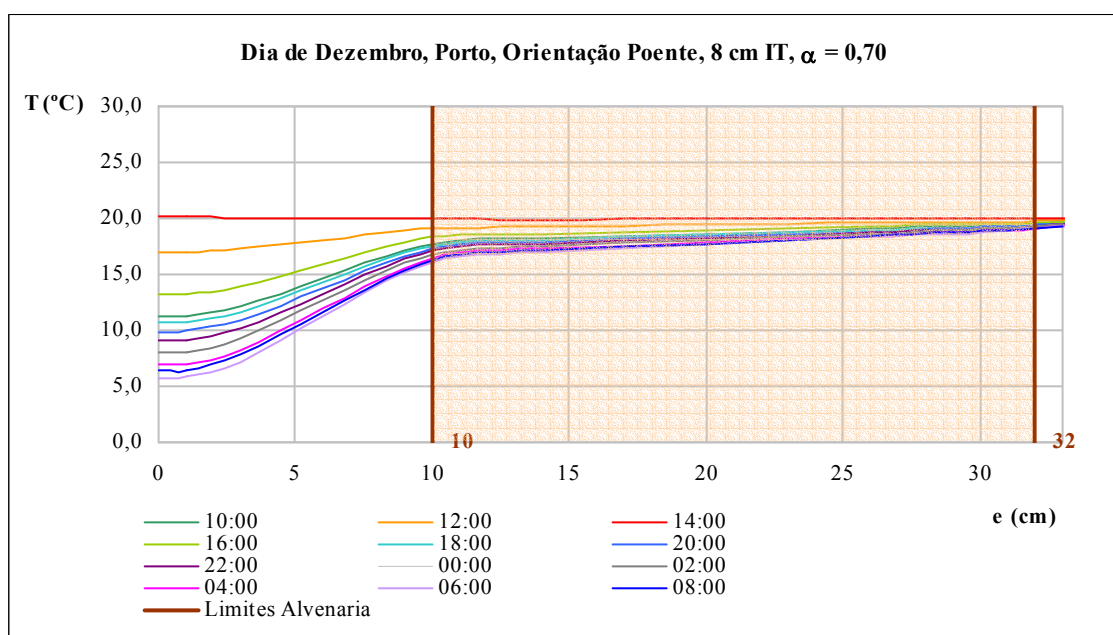


Figura 4.34 – Perfis de temperatura instalados na parede de alvenaria com isolamento térmico pelo exterior, para um dia de Dezembro, na cidade do Porto, orientação Poente, considerando uma espessura de isolante térmico de 8 cm e um valor de $\alpha = 0,70$

4.4.6 ANÁLISE DE RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DO SISTEMA

4.4.6.1 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE VERÃO

As primeiras quatro figuras apresentadas (4.19 a 4.22), correspondendo a uma fachada com orientação Norte (menor incidência de radiação solar) num dia de Julho, permitem desde logo retirar algumas conclusões gerais a merecer destaque:

- As variações de temperatura a que o pano de alvenaria se encontra sujeito são, para o sistema interior, pouco significativas (amplitude térmica máxima de cerca de 19 °C), mesmo considerando uma absorção solar elevada (0,70), em face da reduzida radiação solar incidente;
- Para uma espessura de 3 cm de material isolante térmico a amplitude térmica máxima para o sistema exterior é de cerca de metade (aproximadamente 10 °C);
- Aumentando a espessura do material isolante térmico de 3 para 8 cm, no sistema interior a amplitude térmica máxima mantém-se aproximadamente constante mas aumenta significativamente ao longo da espessura da alvenaria (cerca de 5 °C na zona mais interior junto ao isolante térmico);
- Aumentando a espessura do material isolante térmico de 3 para 8 cm, no sistema exterior a amplitude térmica diminui ao longo de toda a espessura da alvenaria com um valor máximo da ordem dos 5 °C.

A análise prossegue para a fachada orientada a Poente, para a qual a radiação solar atinge valores máximos (Figuras 4.23 a 4.26), com as seguintes conclusões:

- As variações de temperatura a que o pano de alvenaria se encontra sujeito são, para o sistema interior (com uma espessura de 3 cm), muito mais acentuadas do que para a fachada Norte, com uma amplitude térmica máxima de cerca de 33 °C;
- No caso do sistema exterior verifica-se que a amplitude térmica máxima diminui para cerca de 18 °C;

- Aumentando a espessura do material isolante térmico de 3 para 8 cm, mantém-se a mesma tendência da fachada Norte, atingindo-se a amplitude térmica máxima no sistema interior com um valor de cerca de 34 °C;
- Mais uma vez o aumento da espessura do material isolante térmico é notoriamente benéfico no sistema exterior – redução da amplitude térmica máxima para quase metade com um valor da ordem dos 10 °C.

Face à discrepância existente entre os dois sistemas em análise interessa avaliar o efeito da diminuição do coeficiente de absorção solar de 0,70 para 0,30, somente para a situação mais desfavorável sob o ponto de vista do sistema interior, isto é, com uma espessura do material isolante térmico igual a 8 cm. A análise das figuras ilustrativas destas simulações (Figuras 4.27 e 4.28) permite concluir o seguinte:

- No sistema interior a amplitude térmica máxima apresenta uma redução do valor de 34 °C anteriormente registado ($\alpha = 0,70$) para cerca de 24 °C ($\alpha = 0,30$);
- No sistema exterior a amplitude térmica máxima apresenta uma ligeira redução do valor de 10 °C anteriormente registado ($\alpha = 0,70$) para cerca de 7 °C ($\alpha = 0,30$).

4.4.6.2 CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DE INVERNO

As primeiras quatro figuras apresentadas (Figuras 4.29 a 4.32) correspondem a simulações para uma fachada com orientação Sul, desenvolvidas no sentido de averiguar a amplitude térmica máxima num dia de Inverno, com as seguintes conclusões:

- No sistema interior a amplitude térmica máxima ($\alpha = 0,70$) é de cerca de 23 °C, donde se conclui que o fenómeno apresenta menor gravidade no Inverno;
- Este valor passa a ser de cerca de 14 °C para o sistema interior com a diminuição do coeficiente de absorção solar de 0,70 para 0,30;
- As variações de temperatura a que o pano de alvenaria se encontra sujeito são extremamente reduzidas para o sistema exterior com amplitudes máximas de cerca de 6 °C ($\alpha = 0,70$) e de 4 °C ($\alpha = 0,30$).

Finalmente com as Figuras 4.33 e 4.34 pretende-se potenciar uma avaliação da variação anual das temperaturas instaladas na alvenaria para a situação mais desfavorável do sistema interior, comparando-a com uma situação semelhante para o sistema exterior.

Recordando os dados apresentados na Figura 4.25, observa-se uma temperatura máxima instalada na alvenaria de cerca de 51 °C, enquanto que para a mesma situação no Inverno (Figura 4.33) a temperatura mínima é de cerca de 6 °C, o que corresponde a uma amplitude térmica anual da ordem dos 45 °C para um $\alpha = 0,70$.

Atendendo a que o valor da temperatura mínima se mantém aproximadamente constante com a variação do coeficiente de absorção solar, obtém-se (recordando a Figura 4.27 com uma temperatura máxima instalada na alvenaria de cerca de 41 °C) um valor de amplitude térmica anual da ordem dos 35 °C para um $\alpha = 0,30$.

No caso do sistema exterior, e recordando os dados apresentados na Figura 4.26 observa-se uma temperatura máxima instalada na alvenaria de cerca de 29 °C, enquanto que para a mesma situação no Inverno (Figura 4.34) a temperatura mínima é de cerca de 16 °C, o que corresponde a uma amplitude térmica anual da ordem dos 13 °C para um $\alpha = 0,70$.

Novamente atendendo a que o valor de temperatura mínima se mantém aproximadamente constante com a variação do coeficiente de absorção solar, obtém-se (recordando a Figura 4.28 com uma temperatura máxima instalada na alvenaria de cerca de 26 °C) um valor de amplitude térmica anual da ordem dos 10 °C para um $\alpha = 0,30$.

Note-se que este valor não retrata a situação mais desfavorável para o sistema exterior, para o qual uma espessura de 3 cm conduziria a resultados globais mais desfavoráveis, apresentando-se os resultados para uma espessura de 8 cm de modo a compará-los com os do sistema interior, e ainda pela maior representatividade que se crê possam ter na prática no futuro, com a adopção de espessuras de material isolante tendencialmente superiores.

4.4.6.3 RECOMENDAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DO SISTEMA

Admitindo um coeficiente de dilatação térmica linear de $5 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para a alvenaria de tijolo cerâmico furado [23], e considerando os resultados obtidos, estimam-se, mediante a aplicação da Equação 4.5, os valores de alongamento unitário máximo para uma parede sem quaisquer restrições de movimento, que se sintetizam no Quadro 4.24.

$$\frac{\Delta L}{L} \cong \alpha \cdot \Delta t \quad (4.5)$$

Sendo:

$\Delta L/L$ – alongamento unitário, [m/m];

α – coeficiente de dilatação térmica linear, [$^{\circ}\text{C}^{-1}$];

Δt – variação da temperatura, [$^{\circ}\text{C}$].

Quadro 4.24 – Síntese de valores do alongamento unitário de uma parede de alvenaria de tijolo sujeita aos valores de amplitude térmica máxima simulados

Situação	Coeficiente de absorção solar α [-]	Espessura isolante térmico [cm]	Amplitude térmica máxima [$^{\circ}\text{C}$]		Alongamento unitário máximo [mm/m]	
Verão Norte	0,70	3	Int.	19	Int.	0,095
			Ext.	10	Ext.	0,050
Verão Norte	0,70	8	Int.	19	Int.	0,095
			Ext.	5	Ext.	0,025
Verão Poente	0,70	3	Int.	33	Int.	0,165
			Ext.	18	Ext.	0,090
Verão Poente	0,70	8	Int.	34	Int.	0,170
			Ext.	10	Ext.	0,050
Verão Poente	0,30	8	Int.	24	Int.	0,120
			Ext.	7	Ext.	0,035

Situação	Coefficiente de absorção solar α [-]	Espessura isolante térmico [cm]	Amplitude térmica máxima [°C]		Alongamento unitário máximo [mm/m]	
Inverno Sul	0,70	8	Int.	23	Int.	0,115
			Ext.	6	Ext.	0,030
Inverno Sul	0,30	8	Int.	14	Int.	0,070
			Ext.	4	Ext.	0,020
Anual Poente	0,70	8	Int.	45	Int.	0,225
			Ext.	13	Ext.	0,065
Anual Poente	0,30	8	Int.	35	Int.	0,175
			Ext.	10	Ext.	0,050

Os resultados obtidos, com valores que ultrapassam nalgumas situações um alongamento unitário máximo de 0,1 mm/m, justificam a elaboração de um conjunto de recomendações técnicas no âmbito da utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior (com base em [74]), particularmente quando não for garantida a aplicação das soluções mínimas propostas em [41] para a parede de base a utilizar e (ou) as condições de utilização sejam particularmente adversas (ex. $\alpha > 0,70$ e (ou) valores de radiação solar muito elevados).

Uma primeira estratégia prende-se com a redução da solicitação térmica propriamente dita, para a qual importa salientar os seguintes aspectos:

- Recomenda-se a utilização de revestimentos exteriores cuja cor garanta um coeficiente de absorção solar não superior a 0,30;
- Em situações críticas poderá ser prevista a utilização de um revestimento exterior não aderente (ventilado) que proteja a parede da radiação solar directa, ou outro qualquer dispositivo de sombreamento.

No caso da utilização de uma solução construtiva para a parede de base com um coeficiente de dilatação térmica linear muito elevado, será avisado facilitar o movimento da parede de modo a prevenir tensões excessivas, através das seguintes acções:

- Utilização de juntas de dessolidarização entre a alvenaria e a estrutura, atentando à estanquidade da solução adoptada e à resistência a acções horizontais da parede;
- Utilização de argamassas de assentamento menos rígidas (atentando à máxima diminuição de resistência admissível);
- Melhoria das características de elasticidade do revestimento exterior, recorrendo por exemplo à utilização de reboco armado;
- Previsão de juntas de fraccionamento (de dilatação e de retracção) em soluções de grande desenvolvimento dimensional.

No caso de estar em causa a resistência da solução da parede de base (ex. reabilitação), sugerem-se um conjunto de intervenções de reforço:

- Existência de elementos de travamento da alvenaria para restrição de movimentos (pilaretes e (ou) cintas em betão armado);
- Utilização de acessórios para a ligação da parede com a envolvente estrutural (atentando a uma adequada protecção contra a corrosão);
- Colocação de armaduras nas juntas da alvenaria de modo a aumentar a sua resistência ao corte.

Referem-se ainda um conjunto de recomendações globais que devem ser ponderadas na análise desta problemática:

- Garantir uma adequada estabilidade estrutural da parede de suporte;
- Caracterização da estabilidade dimensional dos elementos que constituem a parede de suporte, designadamente o seu coeficiente de dilatação térmica linear;
- Não raras vezes a patologia pode aparecer em pontos singulares conjugando o efeito de diversos factores perniciosos (ex. ponte térmica) pelo que importa assegurar uma perspectiva integrada do problema.

Importa ainda referir que o conjunto de acções propostas possui evidentemente um carácter genérico e orientativo com base na bibliografia de referência neste domínio, devendo ser desenvolvidos estudos específicos no domínio da resistência dos materiais que avaliem o comportamento de uma dada solução de parede exterior face a amplitudes térmicas elevadas, aspecto que extravasa os objectivos do presente trabalho.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DO DESEMPENHO FACE ÀS EXIGÊNCIAS DE CONFORTO TÉRMICO EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

5.1 INTRODUÇÃO

A percepção de um ambiente térmico como confortável, indicando que uma percentagem predefinida de indivíduos expressa satisfação, deriva fundamentalmente do balanço entre a produção de calor interno no organismo e as trocas térmicas com a envolvente, sendo a sensação de conforto maximizada quando ambas se equivalem e se garante a constância da temperatura interna do corpo humano ($\cong 36,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) (admitindo não existirem focos locais de desconforto térmico, tal como se refere posteriormente).

O organismo humano dispõe de um complexo conjunto de mecanismos termoreguladores, tais como a variação do diâmetro dos vasos sanguíneos (vasodilatação ou vasoconstrição), a transpiração e a perspiração, e a alteração do metabolismo interno (transformação de energia química em trabalho e calor), que permitem responder a uma variação do equilíbrio térmico entre um indivíduo e o ambiente envolvente. Um ambiente térmico de conforto será aquele que minimiza a activação dos referidos mecanismos.

A parametrização da sensação de conforto térmico num edifício baseia-se naturalmente nos diferentes processos de troca de calor entre o corpo humano e o ambiente envolvente:

- Convecção, associada à diferença de temperatura entre a pele/vestuário e o ar;
- Radiação, associada à diferença de temperatura entre a pele/vestuário e as superfícies envolventes;
- Evaporação, associada à diferença de humidade entre a pele e o ar (mecanismos de difusão de vapor e (ou) de transpiração forçada);
- Respiração, associada à diferença de humidade e temperatura entre o ar inspirado (normalmente mais “frio” e “seco”) e o ar expirado (mais “quente” e “húmido”).

Os factores que determinam o estado de equilíbrio térmico relacionam-se assim quer com o indivíduo quer com o ambiente higrotérmico interior (Quadro 5.1).

Quadro 5.1 – Principais factores que influenciam o estado de equilíbrio térmico de um indivíduo

Tipo	Parâmetro
Indivíduo	Idade, sexo e estado de saúde
	Tipo de actividade (metabolismo)
	Tipo de vestuário
Ambiente interior	Temperatura do ar
	Temperatura superficial dos elementos de contorno
	Velocidade do ar
	Humidade do ar

Na norma ISO 7730 [71] são definidos valores para diversos parâmetros de conforto térmico, relativos às estações climáticas de Inverno e Verão, para edifícios residenciais e de serviços, entre os quais se destacam no Quadro 5.2 os respeitantes à temperatura operativa e à humidade relativa interior. Note-se que os valores apresentados admitem uma resistência térmica total do vestuário (por indivíduo) igual a 1 clo (= $0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$) no Inverno e a 0,5 clo (= $0,078 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$) no Verão, e um nível de metabolismo de 1,2 met (= $70 \text{ W}/\text{m}^2$), correspondente a uma actividade sedentária.

Tal como havia sido já sugerido no início do capítulo, a minimização da activação dos mecanismos termoreguladores do organismo humano permite garantir uma condição de neutralidade térmica, mas não necessariamente de conforto térmico, visto poderem existir diversos factores locais de desconforto [71]:

- Gradiente vertical de temperatura, cujo valor não deverá exceder $3 \text{ }^\circ\text{C}$ medido às cotas de 10 e 110 cm acima do pavimento (Inverno e Verão);
- Assimetria da temperatura radiante de vãos envidraçados ou outras superfícies verticais cuja temperatura é previsivelmente reduzida, inferior a $10 \text{ }^\circ\text{C}$, em relação a um plano vertical situado 60 cm acima do pavimento (Inverno);

- Assimetria da temperatura radiante de um tecto falso (aquecido) inferior a 5 °C, em relação a um plano horizontal situado 60 cm acima do pavimento (Inverno);
- Temperatura superficial do pavimento compreendida entre 19 e 26 °C (com um valor máximo de 29 °C para o dimensionamento de sistemas de aquecimento próprios tais como pavimentos radiantes) (Inverno);
- Velocidade excessiva do ar (sensação de desconforto em função da temperatura do ar, nível de metabolismo e intensidade de turbulência (razão entre o desvio da velocidade e a velocidade média)) (Inverno e Verão).

Quadro 5.2 – Valores recomendados para alguns parâmetros de avaliação de conforto térmico relacionados com o ambiente higrotérmico interior [71]

Temperatura Operativa ⁱ⁾		
Valores recomendados	Inverno	22 ± 2 °C (20-24 °C)
	Verão	24,5 ± 1,5 °C (23-26 °C)
Humidade Relativa		
Valores recomendados	Inverno ou Verão	30-70%

i) De acordo com [71] a temperatura operativa corresponde, para situações correntes, à média entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante.

Importa ainda referir que a sensação de conforto térmico varia com diversos factores, entre os quais psicológicos, sócio-culturais e geográficos, pelo que a avaliação de um dado ambiente térmico face a uma população estatisticamente aleatória dificilmente resultará numa percentagem de indivíduos em conforto superior a 90% [71].

Em [75] é referida uma experiência paradigmática na qual um inquérito realizado com cerca de 1300 pessoas demonstrou que existem pelo menos 5% de insatisfeitos com qualquer ambiente térmico. Realce-se a propósito que existem outras organizações de referência a propor métodos e parâmetros distintos para avaliação da sensação de conforto térmico (ex. ASHRAE), sendo um domínio onde a investigação se encontra em constante desenvolvimento.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

5.2.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICAÇÃO

O programa seleccionado para proceder à simulação do conforto térmico no interior de um edifício possui a designação comercial de “ECOTECT” (versão 5.2), sendo baseado numa metodologia proposta pelo organismo CIBSE (“The Chartered Institute of Building Services Engineers”), designada de Método da Admitância Térmica (“admittance method” no original) [38], cujo propósito inicial de desenvolvimento foi o de estimar a temperatura máxima prevista num compartimento durante os meses de Verão considerando um regime variável, com particular ênfase na influência da inércia térmica na evolução da temperatura interior de um compartimento.

Ao nível das diferentes famílias de metodologias de simulação do comportamento térmico de um edifício, o Método da Admitância Térmica situa-se num patamar intermédio entre uma simulação simplificada com base num regime de transferência de calor permanente (ex. utilizada na versão actual do RCCTE [27]) e uma simulação com maior detalhe envolvendo a utilização dos métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos.

A metodologia adoptada permite considerar os principais aspectos que determinam a resposta térmica de um edifício, em regime dinâmico, numa base média horária, tais como:

- Trocas de calor por condução através da envolvente opaca exterior (incluindo os efeitos de amortecimento e desfasamento associados à inércia térmica exterior);
- Ganhos solares directos através de vãos envidraçados;
- Ganhos solares indirectos através da envolvente opaca;
- Ganhos internos (relacionados com a própria ocupação do edifício, habitualmente associados a equipamentos, iluminação e pessoas);
- Ventilação e infiltração de ar;
- Trocas de calor com outras zonas do edifício.

De acordo com [76] a aplicação do programa adequa-se particularmente à comparação entre estratégias distintas de concepção térmica da envolvente de edifícios, não sendo recomendado para o dimensionamento de sistemas de climatização interior, para o qual é sobretudo determinante a fiabilidade dos resultados obtidos para um caso individual.

Esta revela ser uma característica decisiva do programa no contexto do tipo de resultados esperados para o presente capítulo, que se pretendem ser eminentemente comparativos entre soluções distintas de concepção térmica da envolvente exterior. Assim, as principais razões que justificam a sua utilização no presente trabalho são:

- Adequação da complexidade da metodologia ao tipo e detalhe de dados de entrada disponíveis, bem como dos resultados pretendidos;
- Período de aprendizagem compatível com o limite de tempo para a realização da análise deste aspecto no conjunto do trabalho desenvolvido;
- Integração dos principais parâmetros de desempenho térmico em regime dinâmico referidos na recente proposta de norma neste domínio [36];
- Possibilidade de realização de um vasto conjunto de simulações em tempo útil;
- Validação da sua utilização mediante a comparação com valores obtidos em monitorização *in situ* em recentes trabalhos científicos [77] [78].

5.2.2 PRINCÍPIOS GERAIS DE CÁLCULO

O princípio base desta metodologia reside na assumpção de que a temperatura interior de uma zona de um edifício tende para a temperatura média diária exterior, com as flutuações na temperatura exterior e na radiação solar repercutindo-se de forma similar na temperatura interior, corrigidas pelo efeito de diversos factores, designadamente:

- Inércia térmica (capacidade de amortecimento e desfasamento da envolvente exterior face às solicitações climáticas exteriores);
- Admitância térmica (tal como definido no Capítulo 2, corresponde à taxa de fluxo de calor entre a superfície interna de um elemento construtivo e o ar, por unidade de variação da temperatura interior).

Consequentemente, a modelização do desempenho térmico de uma zona de um edifício é baseada num conjunto de equações distintas, consoante esteja em causa a avaliação do seu comportamento “médio”, com a inerente temperatura interior “média”, ou do seu comportamento “dinâmico”, com a inerente temperatura interior “efectiva”, pese embora a componente dinâmica seja naturalmente dependente da componente média.

5.2.2.1 COMPORTAMENTO MÉDIO DIÁRIO

Os ganhos solares directos médios diários são determinados pela aplicação da Equação 5.1.

$$Q'_s = S I' A_g \quad (5.1)$$

Sendo:

Q'_s – ganhos solares directos médios diários, [W];

S – factor solar, [-];

I' – radiação solar média diária, [W/m²];

A_g – área útil de envidraçados, [m²].

Os ganhos internos médios diários são determinados pela aplicação da Equação 5.2.

$$Q'_i = \frac{\sum_n g_n t_n}{24} \quad (5.2)$$

Sendo:

Q'_i – ganhos internos médios diários, [W];

g_n – ganho interno n , [W];

t_n – duração do ganho interno n , [h].

Os ganhos directos médios totais (Q'_t) correspondem à soma dos ganhos solares directos médios diários (Q'_s) com os ganhos internos médios diários (Q'_i):

$$Q'_t = Q'_s + Q'_i \quad (5.3)$$

Sendo:

Q'_t – ganhos directos médios diários totais, [W];

Q'_s – ganhos solares directos médios diários, [W];

Q'_i – ganhos internos médios diários, [W].

Conhecendo os ganhos directos médios totais, é possível calcular a temperatura “ambiente” média interior T'_{ei} recorrendo à Equação 5.4.

$$Q'_t = \left(\sum_i A_{gi} U_{gi} + C_v \right) (T'_{ei} - T'_{ao}) + \sum_i A_{fi} U_{fi} (T'_{ei} - T'_{eo}) \quad (5.4)$$

Sendo:

Q'_t – ganhos directos médios diários totais, [W];

A_{gi} – área de zona envidraçada i, [m²];

U_{gi} – coeficiente de transmissão térmica da zona envidraçada i, [W/(m²·°C)];

C_v – perda (ou ganho) térmico médio diário de ventilação (e infiltração), [W/°C];

T'_{ei} – temperatura ambiente interior média diária, [°C];

T'_{ao} – temperatura exterior média diária, [°C];

A_{fi} – área de zona opaca i, [m²];

U_{fi} – coeficiente de transmissão térmica da zona opaca i, [W/(m²·°C)];

T'_{eo} – temperatura fictícia (ar-sol) exterior média diária, [°C].

A temperatura “ambiente” interior (“environmental temperature”) T_{ei} corresponde a uma média ponderada entre a temperatura média radiante e temperatura do ar no interior, de acordo com a Equação 5.5.

$$T_{ei} = 1/3 T_{ai} + 2/3 T_m \quad (5.5)$$

Sendo:

T_{ei} – temperatura ambiente interior, [°C];

T_{ai} – temperatura do ar interior, [°C];

T_m – temperatura média radiante, [°C].

5.2.2.2 COMPORTAMENTO DINÂMICO HORÁRIO

A variação horária da parcela referente aos ganhos solares, relativamente ao valor médio diário, possui uma componente associada aos ganhos solares directos, e outra aos ganhos solares indirectos relacionada com a condução térmica através da envolvente construtiva opaca em consequência da incidência da radiação solar.

A variação média horária face ao valor médio diário, relativa à componente associada aos ganhos solares directos, é determinada pela aplicação da Equação 5.6.

$$\Delta Q_{sd} = S_a A_g (I - I') \quad (5.6)$$

Sendo:

ΔQ_{sd} – variação dos ganhos solares directos médios horários relativamente aos ganhos solares directos médios diários, [W];

S_a – factor solar “corrigido” (ver § 5.4.2), [-];

A_g – área útil de envidraçados, [m²];

I – radiação solar directa média horária, [W/m²];

I' – radiação solar directa média diária, [W/m²].

A variação média horária face ao valor médio diário, relativa à componente associada aos ganhos solares indirectos, é determinada pela aplicação da Equação 5.7.

$$\Delta Q_{si} = f A U (T_{eo} - T'_{eo}) \quad (5.7)$$

Sendo:

ΔQ_{si} – variação dos ganhos solares indirectos médios horários relativamente aos ganhos solares indirectos médios diários, [W];

f – amortecimento térmico, [-];

A – área de zona opaca, [m²];

U – coeficiente de transmissão térmica, [W/(m²·°C)];

T_{eo} – temperatura fictícia (ar-sol) exterior média horária para o intervalo de tempo em análise, subtraído do valor de desfasamento térmico da solução construtiva opaca, [°C];

T'_{eo} – temperatura fictícia (ar-sol) exterior média diária, [°C].

A variação associada à diferença entre a temperatura exterior média horária e o seu valor médio diário, é determinada pela aplicação da Equação 5.8.

$$\Delta Q_a = \left(\sum_i A_{gi} U_{gi} + C_v \right) (T_{ao} - T'_{ao}) \quad (5.8)$$

Sendo:

ΔQ_a – variação associada à diferença entre a temperatura exterior média horária e a temperatura exterior média diária, [W];

A_{gi} – área de zona envidraçada i , [m²];

U_{gi} – coeficiente de transmissão térmica da zona envidraçada i , [W/(m²·°C)];

C_v – perda (ou ganho) térmico médio diário de ventilação (e infiltração), [W/°C];

T_{ao} – temperatura exterior média horária, [°C];

T'_{ao} – temperatura exterior média diária, [°C].

Finalmente resta contabilizar a variação associada à diferença entre os ganhos internos médios horários e o seu valor médio diário, através da aplicação da Equação 5.9.

$$\Delta Q_i = Q_i - Q'_i \quad (5.9)$$

Sendo:

ΔQ_i – variação associada à diferença entre os ganhos internos médios horários e os ganhos internos médios diários, [W];

Q_i – ganhos internos médios horários, [W];

Q'_i – ganhos internos médios diários, [W].

Considerando o somatório das diversas componentes de variação média horária face ao comportamento médio diário, e supondo a existência de uma fonte no interior do compartimento com uma energia equivalente a esse valor, é possível determinar pela aplicação da Equação 5.10 a variação da temperatura ambiente interior média horária face ao seu valor médio diário, e estimar assim o valor da temperatura ambiente interior média horária pela aplicação da Equação 5.11.

$$\Delta Q_t = \Delta Q_{sd} + \Delta Q_{si} + \Delta Q_a + \Delta Q_i = \left(\sum_i A_i Y_i + C_v \right) \Delta T_{ei} \quad (5.10)$$

Sendo:

ΔQ_t – variação térmica total média horária, [W];

ΔQ_{sd} – variação dos ganhos solares directos médios horários relativamente aos ganhos solares directos médios diários, [W];

ΔQ_{si} – variação dos ganhos solares indirectos médios horários relativamente aos ganhos solares indirectos médios diários, [W];

ΔQ_a – variação associada à diferença entre a temperatura exterior média horária e a temperatura exterior média diária, [W];

ΔQ_i – variação associada à diferença entre os ganhos internos médios horários e os ganhos internos médios diários, [W];

A_i – superfície interior (opaca ou envidraçada) i, [m²];

Y_i – admitância térmica do elemento construtivo (opaco ou envidraçado) i, [W/(m²·°C)];

ΔT_{ei} – variação da temperatura ambiente interior média horária face à temperatura ambiente interior média diária, [°C].

$$T_{ei} = T'_{ei} + \Delta T_{ei} \quad (5.11)$$

T_{ei} – temperatura ambiente interior média horária, [°C];

T'_{ei} – temperatura ambiente interior média diária, [°C];

ΔT_{ei} – variação da temperatura ambiente interior média horária face à temperatura ambiente interior média diária, [°C].

5.2.3 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES

Conforme alega Hensen [79] a qualidade da modelação do comportamento de um edifício está intimamente ligada ao domínio por parte do utilizador da ferramenta informática seleccionada, quer ao nível das suas potencialidades, quer particularmente das limitações associadas à forma como é simplificada a situação real. Este aspecto apresenta especial relevância no caso da avaliação das condições térmicas no interior de edifícios, atendendo à elevada quantidade de variáveis físicas e comportamentais que as influenciam, sendo de destacar as seguintes limitações práticas:

- Diferenças entre as condições climáticas efectivas e os valores (com uma dada representatividade estatística) utilizados;
- Diferenças entre o edifício propriamente dito e o modelo de cálculo assumido;
- Diferenças entre os efeitos associados aos ocupantes e a sua modelação (ganhos internos, ventilação natural, climatização interior);
- Diferenças entre as propriedades físicas e térmicas dos materiais construtivos reais e os valores médios assumidos.

A utilização de testes de validação de metodologias de simulação mediante a comparação *inter pares* apresenta-se actualmente como um procedimento célere e económico para a garantia da sua qualidade. Outras técnicas empregues são a validação empírica (ex. por comparação de resultados simulados com valores reais resultantes da monitorização em células de ensaio) e a validação analítica (ex. por comparação com soluções analíticas conhecidas em casos normalmente simples).

No mesmo artigo [79] é relatada a aplicação de um teste de validação resultado da cooperação internacional neste domínio designado “BESTEST” (“International Energy Agency **B**uilding **E**nergy **S**imulation **T**est and Diagnostic Method”), ao programa de cálculo utilizado neste trabalho. O procedimento engloba a análise dos resultados de casos de estudo progressivamente mais complexos de modo a avaliar a capacidade do modelo de simulação integrar diferentes aspectos, mediante a comparação com resultados médios de um conjunto de programas de referência.

A geometria base utilizada para o teste encontra-se ilustrada na Figura 5.1. Os primeiros resultados nos quais foram patentes diferenças significativas (ao nível das necessidades de aquecimento) aconteceram na avaliação da influência da taxas de infiltração de ar, tendo-se concluído que com a sua diminuição os desvios relativos dos resultados obtidos (face ao valor mais próximo obtido com um programa de referência) também diminuem (13,5% para um valor de 1 renovação/hora e 4,2% para 0,5 renovações/hora). Note-se que nas primeiras simulações não foi considerada a influência da existência de vãos envidraçados.

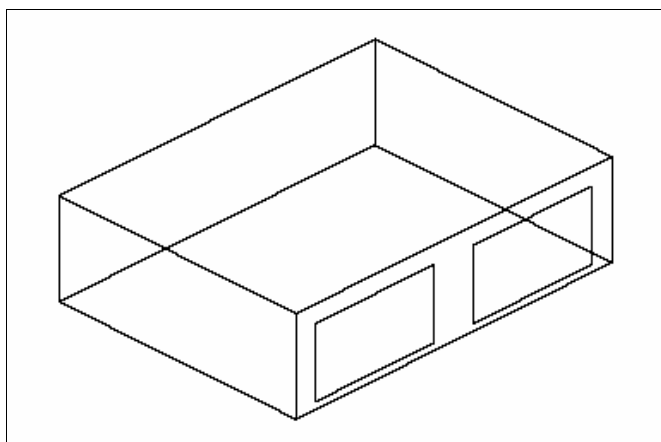


Figura 5.1 – Ilustração do modelo de simulação utilizado para aplicação do “BESTEST” [79]

Um segundo problema detectado em [79] prende-se com a transmissão solar. A estimativa de consumo energético para aquecimento e arrefecimento interior considerando este factor, aparenta ser subestimada no primeiro caso e sobreestimada no segundo. Uma crítica de índole conceptual prende-se com o facto desta metodologia ter sido originalmente concebido para estimar necessidades de arrefecimento máximas durante o Verão, e não para a avaliação do consumo energético de aquecimento e arrefecimento.

A fase de exploração do programa antecedente à sua utilização neste trabalho permitiu identificar igualmente diversas limitações, que se listam seguidamente:

- A avaliação efectua-se unicamente para intervalos de tempo correspondentes a dias independentes entre si, ou seja, como se um determinado dia fosse precedido por um número infinito de dias idênticos;
- Não permite avaliar os valores de temperatura ambiente em diferentes pontos de uma dada zona, assumindo que a sua variação espacial é negligenciável;
- Não permite fazer variar o caudal de ventilação médio ao longo do ano para uma única simulação (somente o faz de forma indirecta);
- Assume que os ganhos solares são uniformemente distribuídos por todas as superfícies internas do espaço;
- Introduce o conceito de factor solar “corrigido” cuja discriminação é somente efectuada para um conjunto limitado de vãos envidraçados.

Efectuando a comparação entre as principais vantagens e desvantagens enunciadas, e atendendo aos objectivos do trabalho, concluiu-se não existirem limitações significativas que obstassem à sua aplicação.

5.3 DADOS CLIMÁTICOS

Para se proceder à simulação do desempenho térmico o programa necessita da introdução de valores médios horários para os seguintes parâmetros (mínimos) de caracterização climática, respeitantes a um ano (representativo) completo:

- Temperatura e humidade relativa exteriores;
- Radiação solar directa e difusa;
- Velocidade do vento.

Recorreu-se para o efeito a uma base de dados climáticas internacional desenvolvida pela AHSRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) designada por IWECC (International Weather for Energy Calculations), disponibilizada pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América para integração no programa EnergyPlus, e que pode ser importada para o formato admitido no programa seleccionado. Ressalve-se que a qualidade desta base de dados foi atestada em trabalho anterior [80] pelo que se considerou a sua utilização como adequada.

Foram escolhidas três cidades representativas das zonas climáticas I1, I2 e I3 consideradas na regulamentação térmica nacional [27], respectivamente Faro, Porto e Bragança.

A cidade de Faro apresenta valores de temperatura exterior elevados ao longo de todo o ano, com valores máximos diários superiores a 35 °C no Verão e valores mínimos diários compreendidos entre 0 e 5 °C no Inverno. Na Figura 5.2 ilustra-se a evolução diária dos valores máximos e mínimos diários da temperatura exterior a partir da aplicação “Weather Tool” (fornecida conjuntamente com o programa “ECOTECT”).

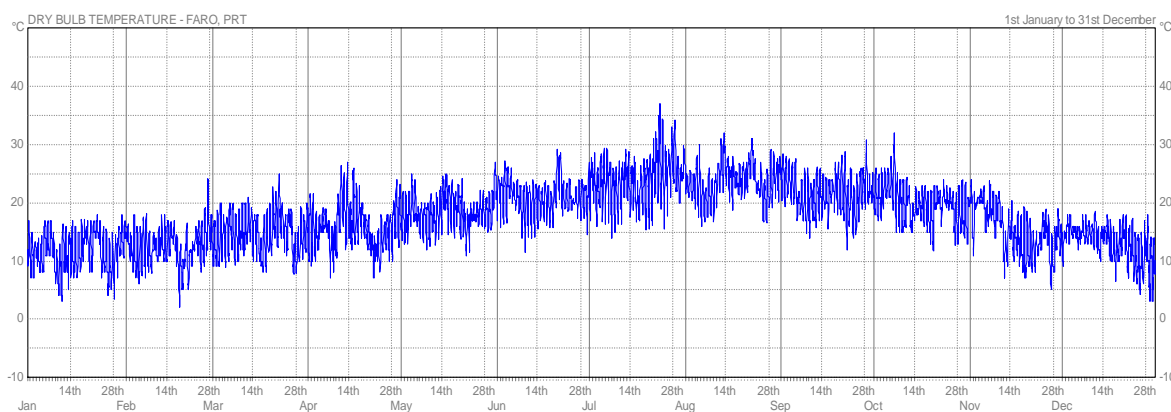


Figura 5.2 – Evolução diária dos valores máximos e mínimos diários da temperatura exterior para a cidade de Faro (aplicação “Weather Tool”)

A cidade do Porto apresenta valores de temperatura exterior moderados ao longo de todo o ano, com valores máximos diários ultrapassando ligeiramente os 30 °C no Verão e valores mínimos diários da ordem dos 0 °C no Inverno (Figura 5.3).

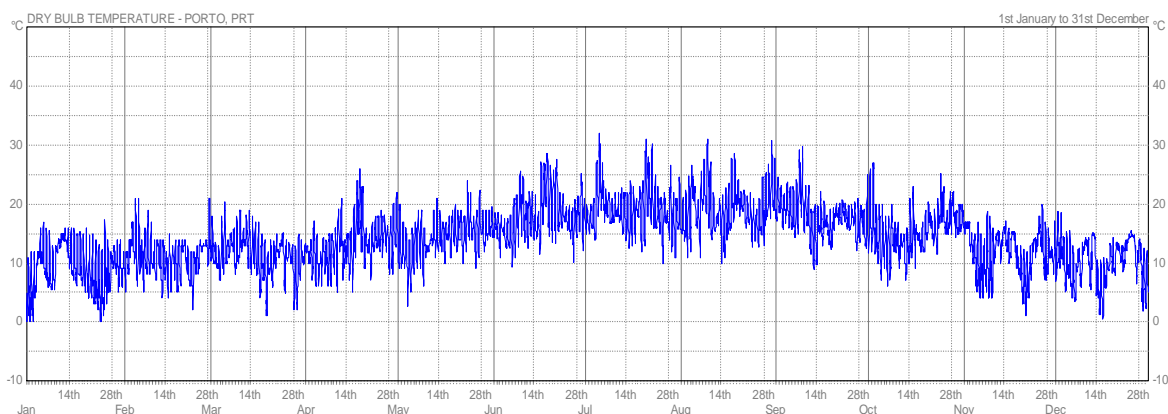


Figura 5.3 – Evolução diária dos valores máximos e mínimos diários da temperatura exterior para a cidade do Porto (aplicação “Weather Tool”)

Quanto à cidade de Bragança os valores de temperatura exterior são tipicamente elevados nos meses de Verão e bastante reduzidos nos meses de Inverno, com valores máximos diários ultrapassando ligeiramente os 35 °C no Verão e valores mínimos diários da ordem dos -5 °C no Inverno, sendo a cidade com a maior amplitude térmica anual (Figura 5.4).

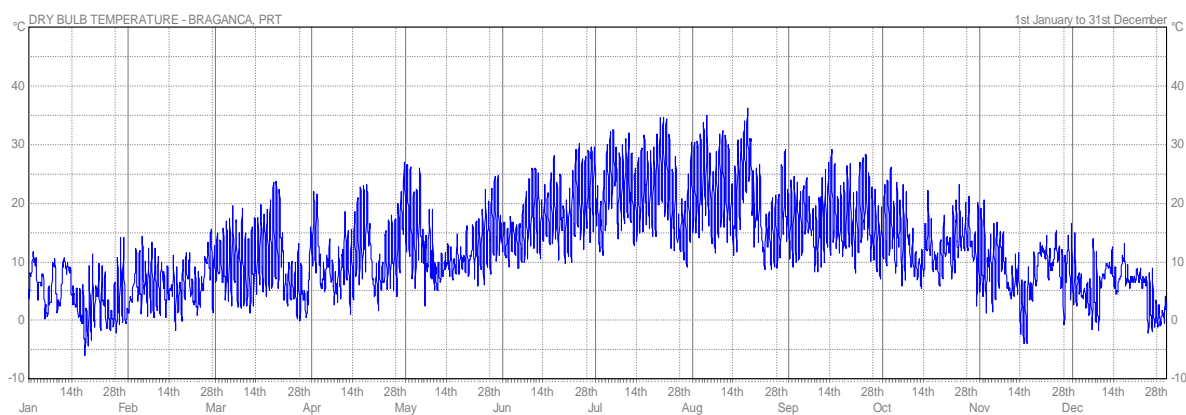


Figura 5.4 – Evolução diária dos valores máximos e mínimos diários da temperatura exterior para a cidade de Bragança (aplicação “Weather Tool”)

5.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS UTILIZADAS

5.4.1 ENVOLVENTE OPACA

As diversas soluções construtivas opacas utilizadas são caracterizadas pelas propriedades térmicas apresentadas no Quadro 5.3. A necessidade do conhecimento de parâmetros representativos do comportamento térmico em regime dinâmico (Y , f , φ) dessas soluções obrigou ao desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo que permitisse a sua predição, baseada na proposta da norma europeia neste domínio [36]. Apresenta-se no Anexo III um exemplo de cálculo para a solução de parede exterior com isolamento térmico pelo interior.

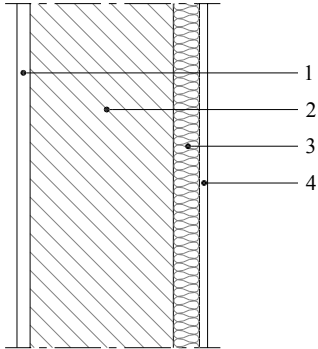
Quadro 5.3 – Propriedades necessárias para a caracterização de uma solução construtiva opaca no programa de simulação utilizado

Designação	Unidade
Coefficiente de transmissão térmica, U	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$
Admitância térmica, Y	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$
Absorção solar, α	$[0-1]$
Transmissividade, T	$[0-1]$
Amortecimento térmico, f	$[0-1]$
Atraso térmico, φ	$[\text{h}]$

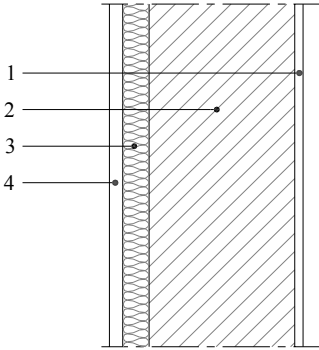
Dado que o valor de transmissividade é sempre nulo, entendeu-se não o incluir nos quadros que resumem os valores das propriedades térmicas para as diversas soluções construtivas, apresentados seguidamente (Quadros 5.4 a 5.8).

Note-se que em algumas das soluções construtivas o valor de U , f , e φ foi considerado aproximadamente igual a zero, tratando-se de um artifício de cálculo destinado a garantir que aquelas materializem fronteiras adiabáticas [76].

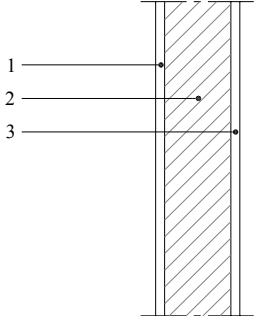
Quadro 5.4 – Caracterização das propriedades térmicas da parede exterior com isolamento térmico pelo interior

Propriedades		Representação Esquemática
U [W/(m ² ·°C)]	0,50	 <p>1. Reboco de ligantes hidráulicos com 2 cm 2. Alvenaria de tijolo cerâmico furado de 22 cm 3. Material isolante térmico com 50 mm 4. Placa de gesso cartonado com 12,5 mm</p> <p>Corte Horizontal, sem Escala</p>
Y [W/(m ² ·°C)]	0,91	
α [0-1]	0,30	
f [0-1]	0,62	
ϕ [h]	5,46	

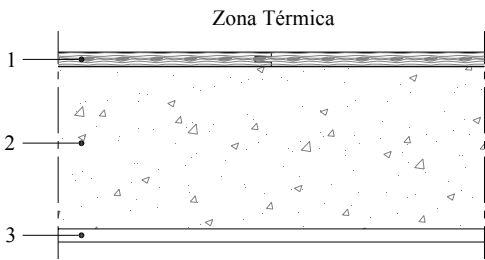
Quadro 5.5 – Caracterização das propriedades térmicas da parede exterior com isolamento térmico pelo exterior

Propriedades		Representação Esquemática
U [W/(m ² ·°C)]	0,50	 <p>1. Placa de gesso cartonado com 12,5 mm 2. Alvenaria de tijolo cerâmico furado de 22 cm 3. Material isolante térmico com 50 mm 4. Reboco de ligantes hidráulicos com 2 cm</p> <p>Corte Horizontal, sem Escala</p>
Y [W/(m ² ·°C)]	2,71	
α [0-1]	0,30	
f [0-1]	0,48	
ϕ [h]	6,24	

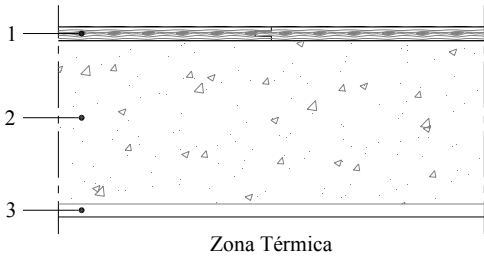
Quadro 5.6 – Caracterização das propriedades térmicas da parede divisória interior

Propiedades		Representação Esquemática
U [W/(m ² ·°C)]	0,0001	 <p>1. Reboco de ligantes hidráulicos com 1,5 cm 2. Alvenaria de tijolo cerâmico furado de 11 cm 3. Reboco de ligantes hidráulicos com 1,5 cm</p> <p>Corte Horizontal, sem Escala</p>
Y [W/(m ² ·°C)]	3,17	
α [0-1]	-	
f [0-1]	0,0001	
ϕ [h]	0,0001	

Quadro 5.7 – Caracterização das propriedades térmicas da laje de pavimento

Propiedades		Representação Esquemática
U [W/(m ² ·°C)]	0,0001	 <p>1. Madeira maciça com 22 mm de espessura 2. Laje em betão armado com 25 cm de espessura 3. Reboco de ligantes hidráulicos com 2 cm</p> <p>Corte Vertical, sem Escala</p>
Y [W/(m ² ·°C)]	3,81	
α [0-1]	-	
f [0-1]	0,0001	
ϕ [h]	0,0001	

Quadro 5.8 – Caracterização das propriedades térmicas da laje de tecto

Propriedades		Representação Esquemática
U [W/(m ² .°C)]	0,0001	 <p>Zona Térmica</p> <p>1. Madeira maciça com 22 mm de espessura 2. Laje em betão armado com 25 cm de espessura 3. Reboco de ligantes hidráulicos com 2 cm</p> <p>Corte Vertical, sem Escala</p>
Y [W/(m ² .°C)]	5,57	
α [0-1]	-	
f [0-1]	0,0001	
φ [h]	0,0001	

5.4.2 VÃOS ENVIDRAÇADOS

Os vãos envidraçados são caracterizados pelas propriedades definidas no Quadro 5.9 e que se detalham no Quadro 5.10.

Quadro 5.9 – Propriedades necessárias para a caracterização de um vão envidraçado no âmbito do programa de simulação utilizado

Designação	Unidade
Coeficiente de transmissão térmica, U	[W/(m ² .°C)]
Admitância térmica, Y	[W/(m ² .°C)]
Factor solar, FS	[0-1]
Transmissividade, T	[0-1]
Índice de refração do vidro, IR	[-]
Factor solar (construção “pesada”), FS _p	[0-1]
Factor solar (construção “leve”), FS _l	[0-1]

Quadro 5.10 – Caracterização da solução do vão envidraçado utilizado nas simulações

Designação	U [W/(m ² ·°C)]	Y [W/(m ² ·°C)]	FS [0-1]	T [0-1]	IR [-]	FS_p [0-1]	FS_i [0-1]
Vidro duplo com caixilharia de alumínio ⁱ⁾	2,7	2,8	0,71	0,92	1,74	0,42	0,56

ⁱ⁾ Foram utilizados os valores propostos na base de dados do programa (solução 6(30)6 mm)

Importa neste ponto referir que a noção de factor solar “corrigido” corresponde à forma encontrada no Método da Admitância Térmica para abordar a questão da transmissão solar de uma forma coerente com a restante metodologia (sendo o factor solar “corrigido” referente ao comportamento dinâmico horário), equivalendo ao quociente entre a variação da carga térmica no interior do espaço por efeito da radiação solar, e a efectiva variação da radiação solar exterior, diferindo consoante a construção seja do tipo “pesada” ou “leve”.

Embora se trate de um dos aspectos que suscita maiores críticas a esta metodologia [79], a sua relevância no âmbito da aplicação neste trabalho é reduzida, uma vez que o objectivo fundamental é a comparação entre sistemas de isolamento térmico distintos mantendo as demais condições constantes. Este aspecto seria já problemático por exemplo no caso de se pretender analisar soluções distintas de vãos envidraçados.

5.5 SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO

5.5.1 CONDIÇÕES GERAIS DE SIMULAÇÃO

A utilização do programa de simulação pressupõe a definição de algumas condições gerais, cuja discriminação numérica é fundamental para a análise dos resultados das simulações apresentada subsequentemente, a saber:

- Temperaturas de conforto térmico;
- Caudal de ventilação;
- Ganhos internos associados ao tipo de actividade.

A sua caracterização encontra-se detalhada no Quadro 5.11 para os factores relacionados com o ambiente higrotérmico interior e no Quadro 5.12 para os factores relacionados com os indivíduos, acompanhada de uma justificação técnica dos valores adoptados.

Quadro 5.11 – Condições gerais de simulação – ambiente higrotérmico interior

Temperaturas Interiores de Conforto	
Valores adoptados	20-25 °C (T_{ei} de acordo com a Equação 5.5)
Justificação	<p>Reunião dos valores de conforto para Verão e Inverno definidos na ISO 7730 [71] para uma actividade sedentária, considerando igualmente os limites previstos na regulamentação térmica nacional [27].</p> <p>Note-se que se procedeu à simplificação de considerar a temperatura operativa [71] semelhante à temperatura ambiente interior.</p>
Caudal de Ventilação	
Valor adoptado	0,6 renovações por hora
Justificação	<p>Como foi já referido, a fiabilidade do programa diminui com o caudal de ventilação [79], pelo que se entendeu limitá-lo a um valor mínimo aceitável de modo a garantir condições de qualidade do ar durante o Inverno [27].</p>

Quadro 5.12 – Condições gerais de simulação – (indivíduos)

Ganhos Internos – Ocupação, Equipamentos e Iluminação	
Valor adoptado	6,7 W/m ²
Justificação	<p>Considerou-se um valor superior ao proposto em [27] para edifícios residenciais (4,0 W/m²), atendendo a duas razões fundamentais:</p> <ul style="list-style-type: none"> - o valor proposto em [27] é um valor médio para todo o fogo que não admite uma ocupação contínua apenas num compartimento (adverte-se aliás em [27] que os ganhos podem ser muito variáveis em função do tipo de fonte interna existente); - a consideração da ocupação contínua do compartimento (para a qual se definem as exigências de conforto térmico) impõe como mínimo um valor de 80 W por pessoa [71], o que para uma área em planta de 12 m² (menor valor no conjunto das situações desenvolvidas) corresponde ao valor adoptado.

5.5.2 CARACTERIZAÇÃO GERAL DO TIPO DE SITUAÇÃO ANALISADA

As simulações foram desenvolvidas para um compartimento de um edifício residencial no qual seja expectável a permanência prolongada de uma ou mais pessoas, com as inerentes exigências de conforto térmico.

Os tipos de compartimentos que se enquadram neste padrão de utilização são sobretudo os quartos, os escritórios (ou outros espaços de lazer e (ou) trabalho) e as salas.

Numa primeira fase foram realizadas uma série de simulações admitindo a não existência de vãos envidraçados, de modo a centrar a avaliação no desempenho da solução da envolvente opaca exterior (integrando o sistema de isolamento térmico).

Posteriormente foi considerada a existência de vãos envidraçados, com uma superfície correspondente a 15% da área de pavimento, independentemente da orientação da parede exterior (pese embora se saiba que na prática esse valor deva variar com a orientação para otimizar o desempenho térmico do edifício).

Atendendo à disposição habitual deste tipo de compartimentos em edifícios residenciais, dividiram-se os diversos casos analisados em dois grandes grupos:

- Compartimento com uma fachada exposta;
- Compartimento com duas fachadas expostas.

De modo a avaliar a influência da geometria do compartimento utilizou-se como parâmetro distintivo o factor de forma, de acordo com a actual regulamentação térmica [27]. Trata-se do quociente entre o somatório das áreas da envolvente exterior e interior do edifício ou fracção autónoma com exigências térmicas, e o respectivo volume interior (note-se que nos casos estudados a área relativa à envolvente interior não foi integrada na quantificação do factor de forma uma vez ter sido considerada como uma fronteira adiabática).

Foram a este nível definidas duas situações-tipo que se entendem ser representativas dos referidos compartimentos em edifícios residenciais, que conjuntamente com o n.º de fachadas expostas e com o factor orientação da fachada, conduzem a um conjunto de situações simuladas que se sintetizam nos Quadros 5.13, 5.14 e 5.15.

Quadro 5.13 – Síntese de situações analisadas

Situação	Factor de Forma	
	0,15	0,25
1 fachada exposta	0,15	0,25
2 fachadas expostas	0,38	0,58

Finalmente foram propostos dois períodos de ocupação distintos de modo a simular quer um cenário de ocupação contínua de um compartimento com necessidades de conforto térmico, quer um cenário típico de utilização em edifícios residenciais em que somente durante o período entre o final da tarde e o início da noite se exigem elevadas condições de conforto térmico no usufruto dos compartimentos:

- Ocupação contínua (com necessidade de conforto) entre as 00:00 e as 24:00;
- Ocupação restrita (com necessidade de conforto) entre as 18:00 e as 24:00.

5.5.3 EXEMPLO DE CÁLCULO

Precedendo a apresentação e análise de resultados propriamente ditas é exposto neste ponto um exemplo de cálculo de modo a introduzir alguns conceitos e nomenclaturas utilizadas posteriormente, e também a clarificar sobre o tipo de simulação efectuada e a interpretação dos resultados obtidos.

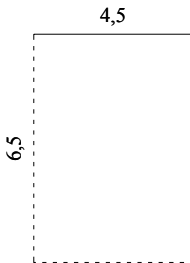
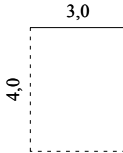
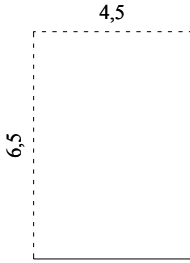
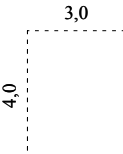
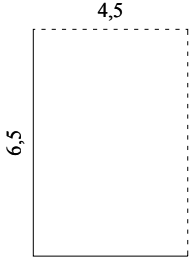
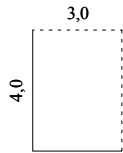
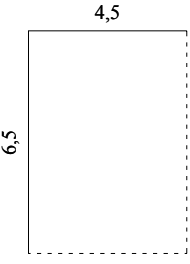
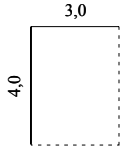
Quadro 5.14 – Representação esquemática (planta) das situações simuladas para a situação de uma fachada exposta (sem e com vãos envidraçados)

	Factor de Forma = 0,15	Factor de Forma = 0,25
Norte		
Sul		
Este		
Oeste		

Nota1: os números apresentados junto às figuras correspondem às respectivas dimensões [m];

Nota2: considerou-se um valor de pé-direito constante igual a 2,5 m.

Quadro 5.15 – Representação esquemática (planta) das situações simuladas para a situação de duas fachadas expostas (sem e com vãos envidraçados)

	Factor de Forma = 0,38	Factor de Forma = 0,58
Nordeste		
Sudeste		
Sudoeste		
Noroeste		

Nota1: os números apresentados junto às figuras correspondem às respectivas dimensões [m];

Nota2: considerou-se um valor de pé-direito constante igual a 2,5 m.

Primeiramente, e atendendo ao considerável número de simulações desenvolvidas, importa esclarecer sobre a designação adoptada para cada uma. Assim, foram escolhidos cinco factores distintivos que permitem identificar uma determinada situação:

- N.º de fachadas expostas: 1F (uma fachada) ou 2F (duas fachadas);
- Orientação da(s) fachada(s): (N, S, E, O, NE, SE, SO, NO);
- Factor de forma (%): 15, 25, 38 ou 58;
- Ocupação: 24h (00:00-24:00) ou 6h (18:00-24:00);
- Vãos envidraçados: sem vãos (SV) ou com vãos (CV).

Assim, a designação adoptada para o exemplo de cálculo seleccionado (1F E 15 24h SV) corresponde a uma situação com uma fachada exposta, orientada a Este, com um factor de forma igual a 0,15, um período de ocupação de 24 h, e sem vãos envidraçados.

Em segundo lugar é necessário esclarecer sobre o tipo de resultados obtidos. A utilização de um programa de simulação desta natureza potencia a obtenção de um vasto conjunto de resultados referentes a inúmeros parâmetros de avaliação, cuja quantidade poderá ser nalguns casos contraproducente face ao propósito final do trabalho.

Por conseguinte, e uma vez que o objectivo do presente capítulo é averiguar o contributo do sistema de isolamento térmico para as condições de conforto térmico interior, foi seleccionado como parâmetro de avaliação o n.º de graus-hora de desconforto térmico, atendendo aos valores limite de conforto de 20 °C e 25 °C anteriormente definidos.

Trata-se de um parâmetro pertinente na medida em que permite averiguar quer a duração do desconforto térmico quer a sua magnitude, uma vez que é obtido pelo produto entre o n.º total de horas em que, durante um ano, a temperatura interior é inferior a 20 °C (no caso do desconforto associado a temperaturas reduzidas) ou superior a 25 °C (no caso do desconforto associado a temperaturas elevadas) pelo n.º total de graus em que os referidos limites de conforto são violados.

A Figura 5.5 representa um exemplo da forma como são apresentados os resultados com base no parâmetro graus-hora de desconforto térmico.

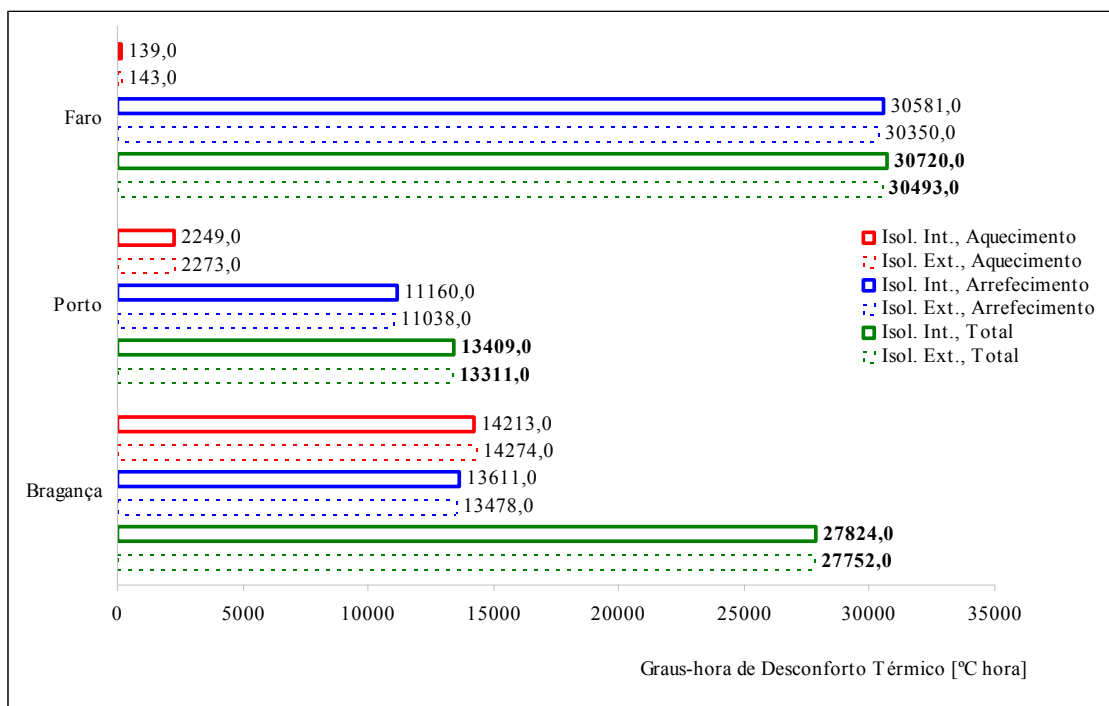


Figura 5.5 – Exemplo de resultados para a situação 1F E 15 24h SV

Com este tipo de apresentação pretende-se aglutinar num único diagrama, e para uma dada situação, um vasto conjunto de aspectos, designadamente:

- Desempenho distinto dos sistemas de isolamento térmico pelo interior (a traço contínuo) e pelo exterior (a traço interrompido);
- Comparação de resultados para as cidades de Faro, Porto e Bragança;
- Avaliação do n.º de graus-hora associados a temperaturas inferiores ao limite de conforto definido (requerendo aquecimento) (a vermelho) – desconforto parcial;
- Avaliação do n.º de graus-hora associados a temperaturas superiores ao limite de conforto definido (requerendo arrefecimento) (a azul) – desconforto parcial;
- Avaliação do desconforto térmico global (a verde), correspondente ao somatório das parcelas referentes a aquecimento e arrefecimento.

Refira-se a propósito que o parâmetro de avaliação seleccionado permite, ainda que de forma indirecta e qualitativa, estimar as necessidades de aquecimento ou de arrefecimento associadas à utilização de cada um dos sistemas.

A avaliação quantitativa das necessidades de aquecimento/arrefecimento de modo a permitir comparar de uma forma fidedigna o desempenho dos dois sistemas exige o recurso a programas de cálculo específicos e de grande complexidade no domínio do especialidade de AVAC, visto estarem em causa um vasto conjunto de factores dos quais se destacam os associados ao tempo de resposta dos equipamentos de climatização e à sua interacção com a envolvente interior, alerta efectuado pelo próprio autor do programa utilizado neste trabalho [76].

A aplicação de um programa com uma abordagem simplificada a este nível somente permite obter uma estimativa pouco precisa das necessidades de climatização interior, particularmente para a comparação entre duas situações de referência muito similares (fachada dotada de um sistema de isolamento térmico pelo interior ou pelo exterior) onde a admitância térmica constitui o principal factor distintivo.

Ainda assim, importa referir que foram efectuadas diversas simulações ao nível do consumo energético, não se observando variações significativas no que respeita aos valores globais obtidos para cada um dos sistemas. Contudo, e atendendo às razões expostas, entendeu-se não se justificar a sua apresentação e análise.

5.5.4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Importa realçar, previamente à apresentação e análise de resultados, que dada a elevada quantidade de informação obtida a partir do conjunto de simulações efectuadas, não serão exibidos os diagramas ilustrativos dos resultados obtidos para todas as situações simuladas, mas somente os mais representativos em função das conclusões retiradas após uma análise exaustiva dos mesmos.

5.5.4.1 1 FACHADA, SEM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 00:00-24:00

Os valores de desconforto parcial para temperaturas inferiores ao limite definido (20 °C) são para a orientação Norte praticamente iguais nos dois sistemas de isolamento (Figura 5.6), mas ligeiramente mais elevados para o sistema exterior nas orientações Sul, Este e Oeste (ex. Figura 5.7 para Sul) devido ao efeito da radiação solar.

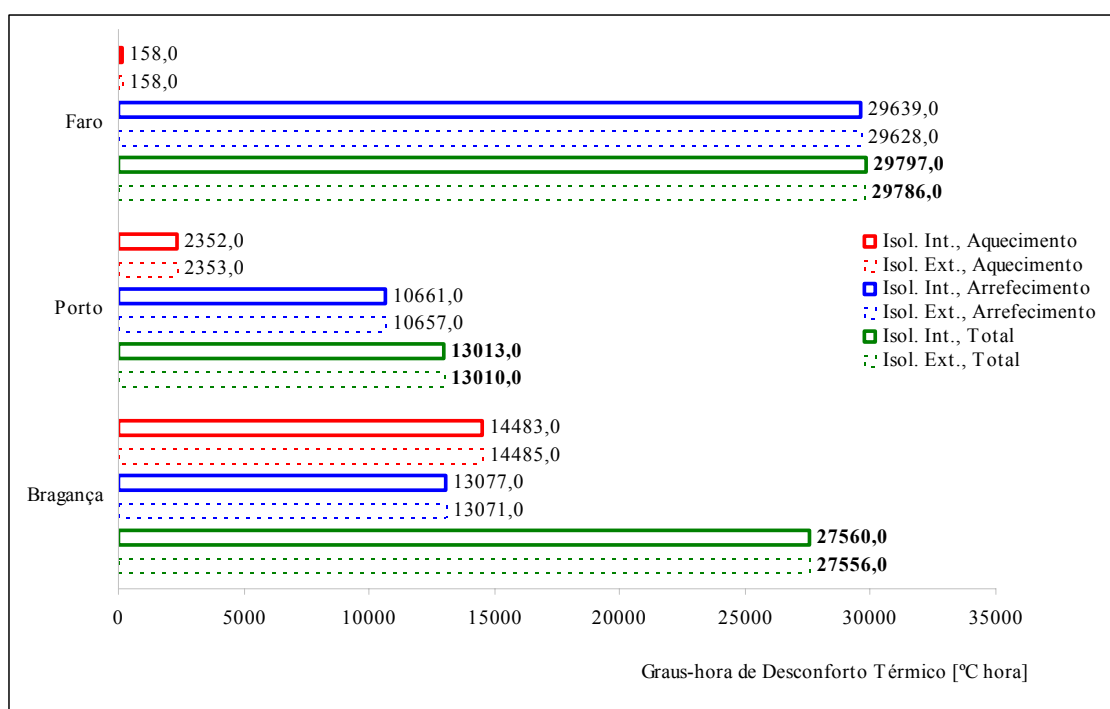


Figura 5.6 – Desconforto térmico global para a situação 1F N 15 24h SV

A tendência inversa verifica-se para o desconforto parcial associado a temperaturas superiores ao limite definido (25 °C), observando-se na orientação Norte valores praticamente iguais para os dois sistemas (Figura 5.6), mas ligeiramente mais elevados para o sistema interior nas orientações Sul, Este e Oeste (ex. Figura 5.7 para Sul).

Nota-se assim nestes primeiros resultados uma ligeira tendência do sistema interior para garantir melhores condições de conforto térmico nos meses de Inverno (aquecimento) e piores condições de conforto térmico nos meses de Verão (arrefecimento).

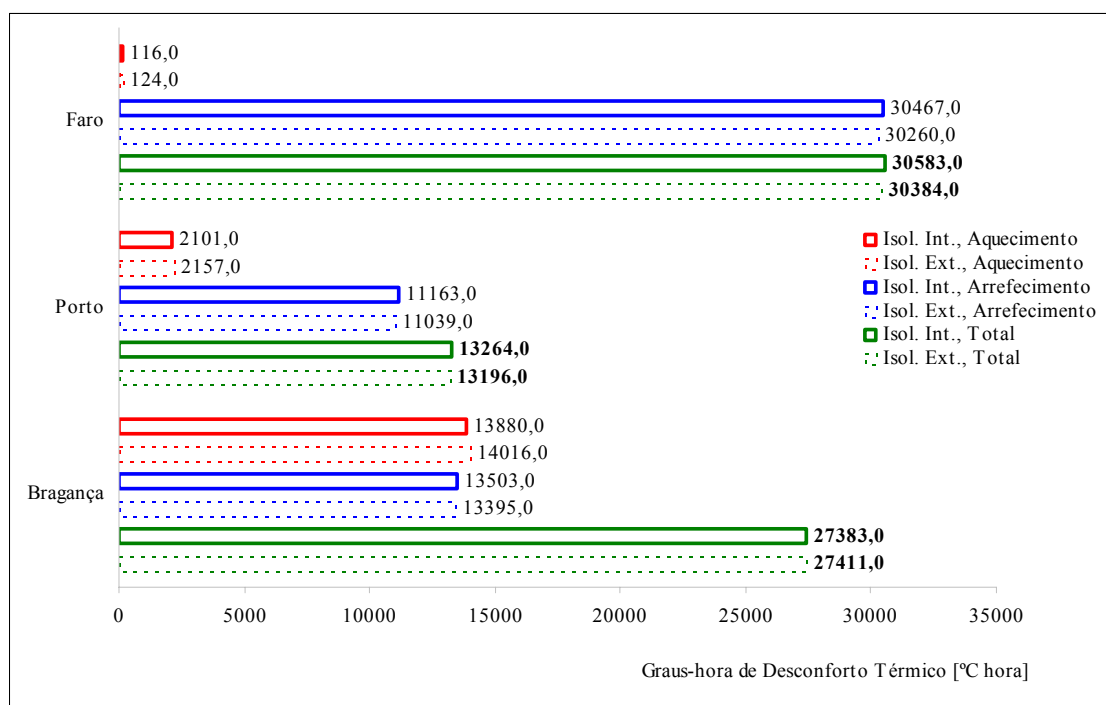


Figura 5.7 – Desconforto térmico global para a situação 1F S 15 24h SV

A análise do desconforto global revela que o sistema interior, sobretudo para as orientações Sul, Este e Oeste, apresenta um desempenho tendencialmente inferior ao sistema exterior (exceptuando o caso de Bragança para a fachada Sul em que os valores globais para os dois tipos de sistema se equivalem), sendo preponderante o melhor desempenho do último nos meses de Verão.

A tendência para o melhor desempenho do sistema interior nos meses de Inverno pode ser confirmada pela comparação da diferença de desempenho global entre os dois sistemas nas três cidades analisadas, consideravelmente inferior para o Porto e Bragança.

Com o incremento do factor de forma de 0,15 para 0,25 o desconforto parcial (para ambos os sistemas) aumenta significativamente no caso do aquecimento, decrescendo no caso do arrefecimento, sendo o efeito relativo mais pronunciado no caso do aquecimento, conforme pode ser constatado, para a orientação Sul, confrontando as Figura 5.7 e 5.8. Este efeito é igualmente constatado para as orientações Norte, Este e Oeste com variações relativas similares comparando as duas situações de desconforto.

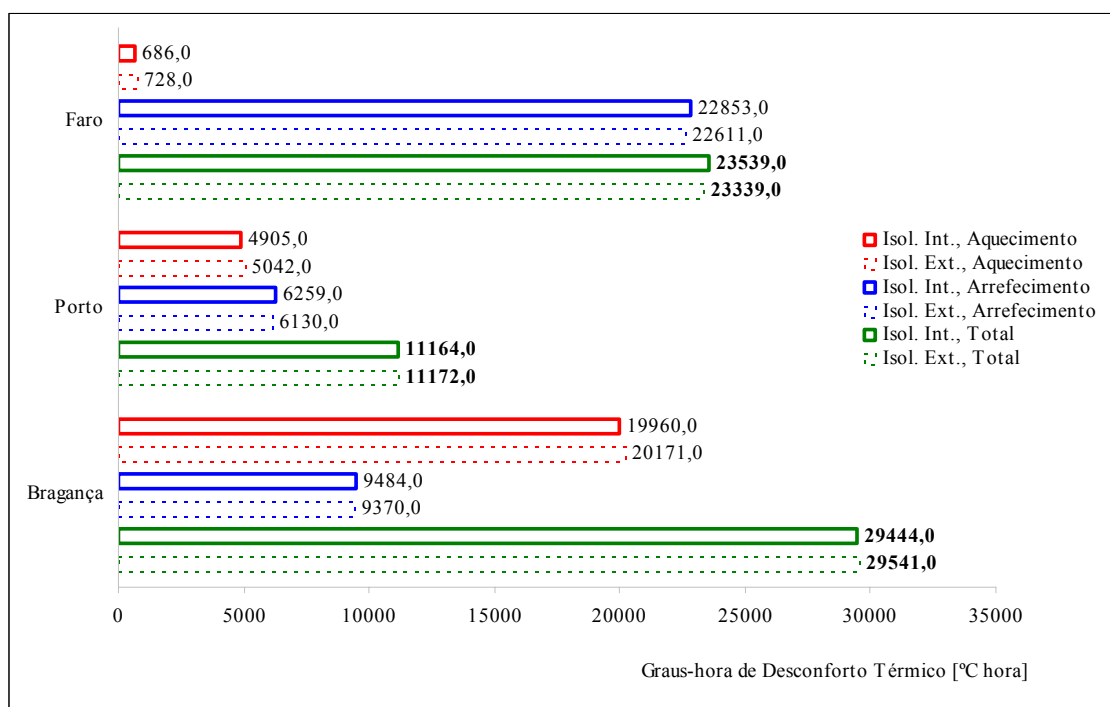


Figura 5.8 – Desconforto térmico global para a situação 1F S 25 24h SV

Note-se contudo que as diferenças absolutas de desconforto parcial entre os dois factores de forma são superiores no caso do arrefecimento para as cidades de Faro e Porto, e no caso do aquecimento em Bragança.

Importa ainda destacar, para ambos os sistemas e para as diversas orientações, uma tendência de decréscimo do desconforto global com o incremento do factor de forma na cidade de Faro, para a qual o desconforto parcial associado a temperaturas elevadas é preponderante (e menos significativamente no Porto), revelando uma tendência inversa na cidade de Bragança, para a qual é decisivo o desconforto associado a temperaturas baixas.

Assim, com um factor de forma de 0,25, em Faro o sistema exterior continua a adequar-se melhor para todas as orientações (aumentando inclusive a diferença em relação ao desempenho global do sistema interior); já no Porto e em Bragança, observa-se uma diminuição da eficácia do desempenho global do sistema exterior, traduzindo-se mesmo numa ligeira predominância do sistema interior para algumas orientações.

5.5.4.2 1 FACHADA, SEM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 18:00-24:00

No caso da ocupação do edifício se restringir ao período entre as 18:00 e as 24:00 constata-se que o desconforto parcial associado a temperaturas inferiores ao limite definido passa a ser preponderante nas três cidades e para as diversas orientações analisadas (ex. Figuras 5.9 e 5.10 para as orientações Norte e Oeste), aspecto determinante uma vez que o sistema interior se revela tendencialmente mais eficaz em situações de aquecimento.

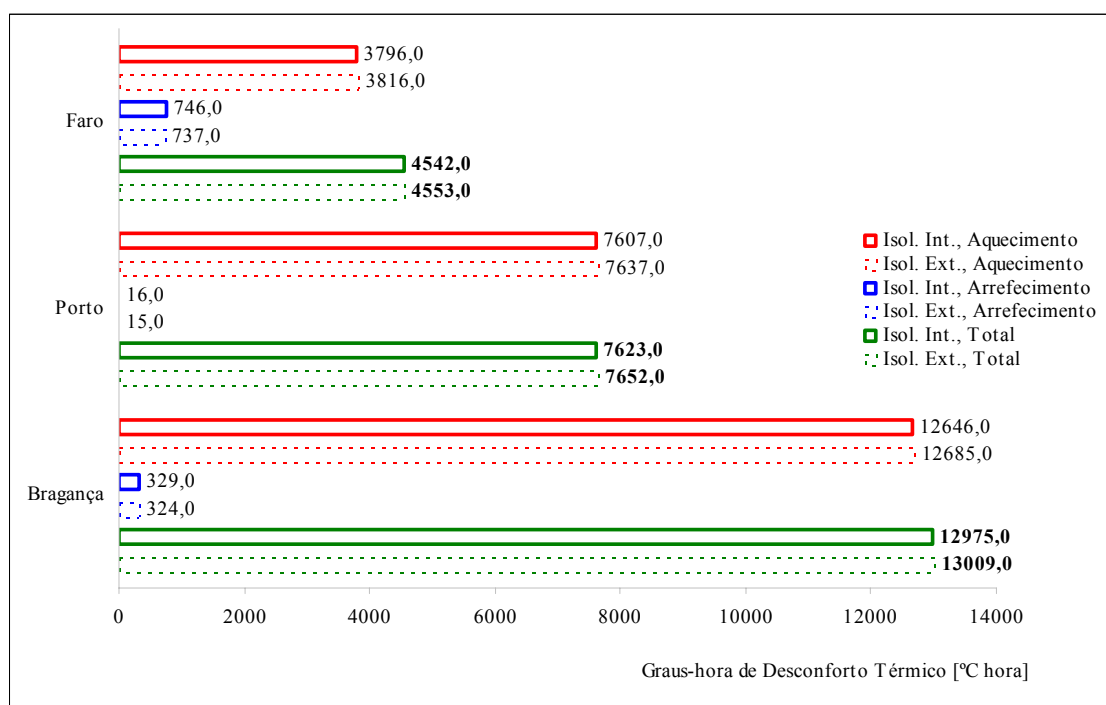


Figura 5.9 – Desconforto térmico global para a situação 1F N 15 6h SV

De facto, atentando aos resultados de desconforto global, observa-se que o sistema interior passa a ser mais eficaz nas três cidades analisadas, isto é, o seu efeito pernicioso ao nível da ocorrência de sobreaquecimento passa a ser menos relevante.

Esta constatação é robustecida analisando os resultados obtidos para as orientações mais expostas à radiação solar (Sul, Este e Oeste) nas quais ainda assim o sistema interior apresenta um melhor desempenho global nas três cidades (ex. Figura 5.10 para Oeste).

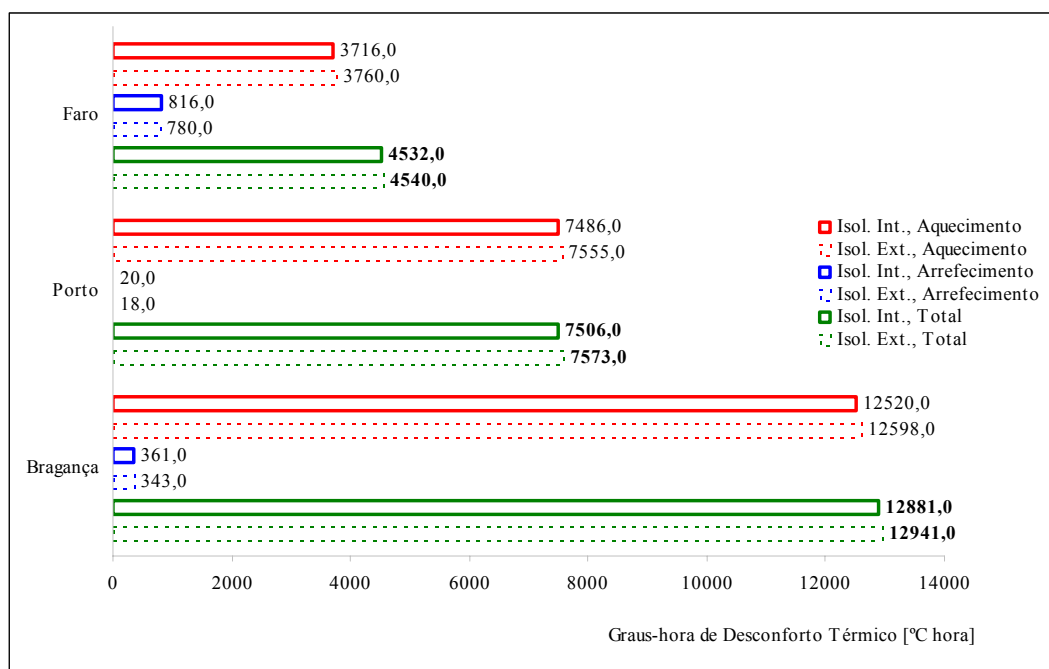


Figura 5.10 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 15 6h SV

Com o aumento do factor de forma de 0,15 para 0,25 o desconforto global cresce para as três cidades analisadas em consequência da preponderância das temperaturas inferiores ao limite de conforto definido, o que se pode verificar confrontando as Figuras 5.10 e 5.11 (correspondentes a um exemplo para a orientação Oeste), favorecendo o sistema interior.

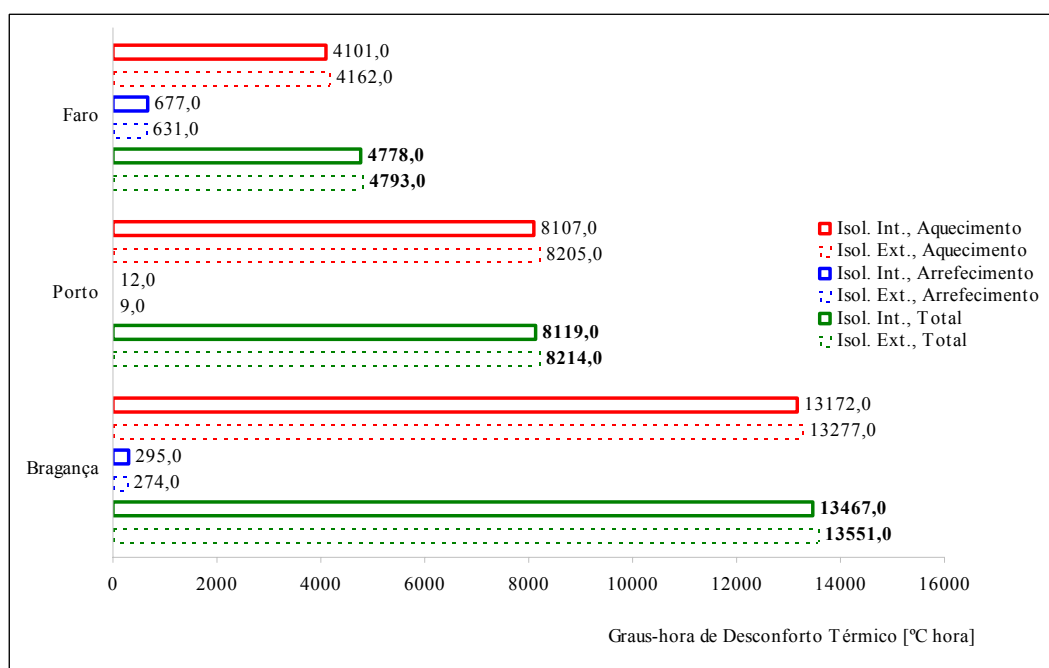


Figura 5.11 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 25 6h SV

5.5.4.3 1 FACHADA, COM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 00:00-24:00

Neste ponto prossegue-se a análise desenvolvida para uma fachada exposta, desta feita porém com a introdução de um vão envidraçado com uma área correspondente a 15% da área de pavimento do compartimento.

Analisando os resultados obtidos para a orientação Norte (Figura 5.12), e tal como acontecia na situação anteriormente apresentada para a fachada opaca, constata-se que o desconforto térmico é similar para ambos os tipos de sistema, o que se traduz em valores de desconforto térmico global equivalentes.

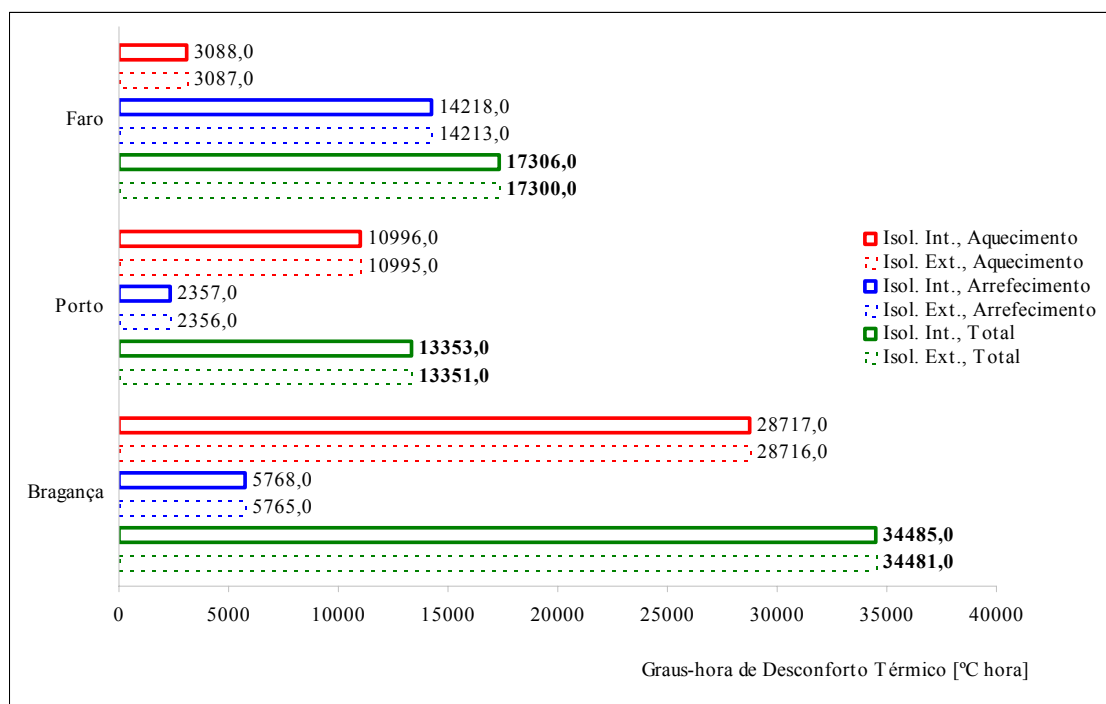


Figura 5.12 – Desconforto térmico global para a situação 1F N 15 24h CV

Já para as orientações Sul, Este e Oeste (ex. Figura 5.13 para Oeste), as diferenças entre os dois tipos de sistema são mais notórias, confirmando-se a mesma tendência já identificada para o caso da fachada sem vãos envidraçados.

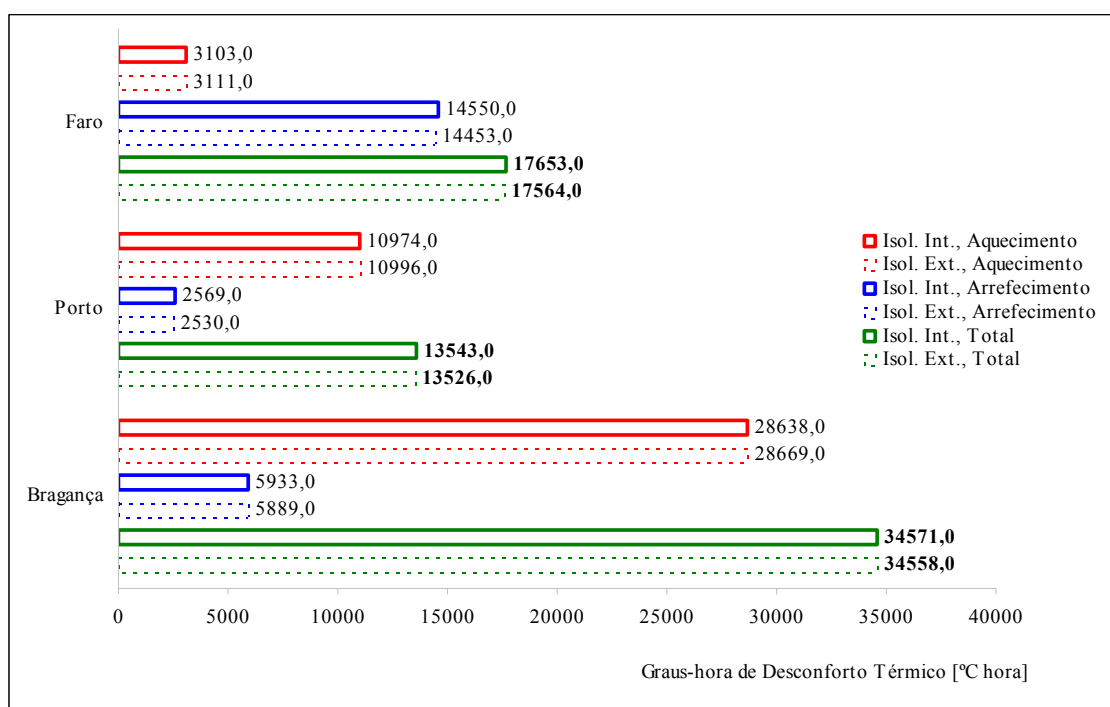


Figura 5.13 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 15 24h CV

O desempenho do sistema exterior é sobretudo melhor na cidade de Faro, onde é mais perceptível o sobreaquecimento introduzido pelo sistema interior. Nas cidades do Porto e de Bragança os resultados obtidos são mais equilibrados embora tendencialmente mais desfavoráveis para o sistema interior.

É interessante notar que a presença de envidraçados faz diminuir as diferenças entre os dois sistemas em todas as orientações (exceptuando as orientações N e S para a cidade de Bragança), facto relacionável com o menor sobreaquecimento verificado decorrente do aumento das perdas de calor por condução através destes elementos (note-se que o período de ocupação considerado engloba o período nocturno).

Com o incremento do factor de forma de 0,15 para 0,25 o desconforto parcial aumenta no caso do aquecimento e diminui para o arrefecimento em todas as cidades e orientações, embora o efeito relativo seja menos pronunciado do que no caso da fachada opaca, como é exemplificado na Figura 5.14 para a orientação Oeste.

Verifica-se novamente o decréscimo do desconforto global na cidade de Faro e o acréscimo na cidade de Bragança, destacando-se um comportamento distinto em relação à fachada opaca para a cidade do Porto, para a qual o desconforto global aumenta agora com o factor de forma, o que se revela favorável ao sistema interior (confronte-se para o efeito as Figuras 5.8 e 5.15).

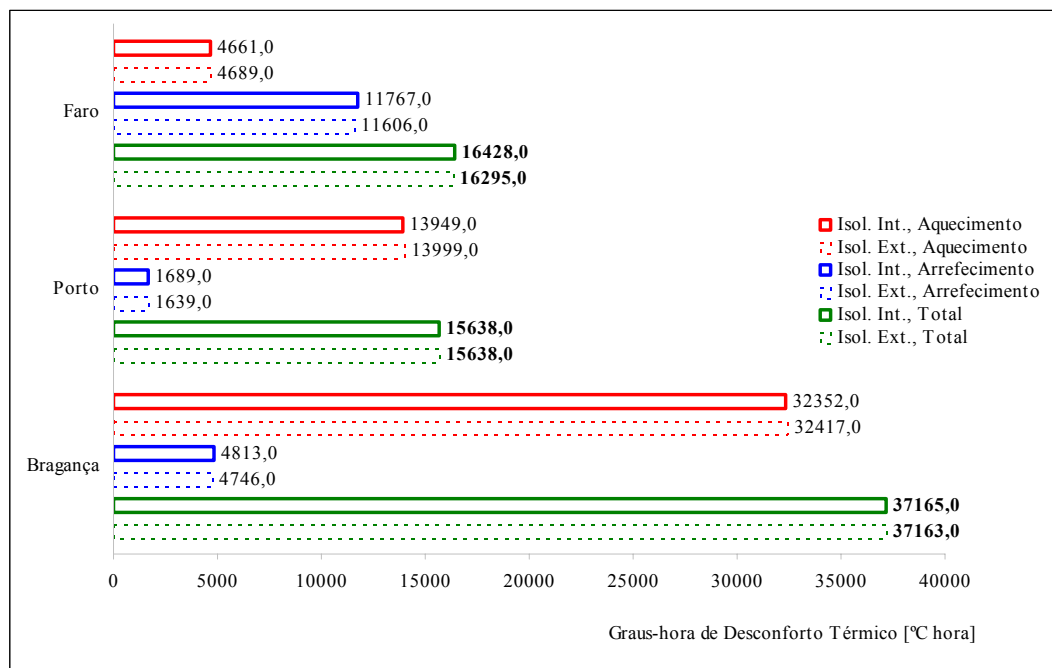


Figura 5.14 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 25 24h CV

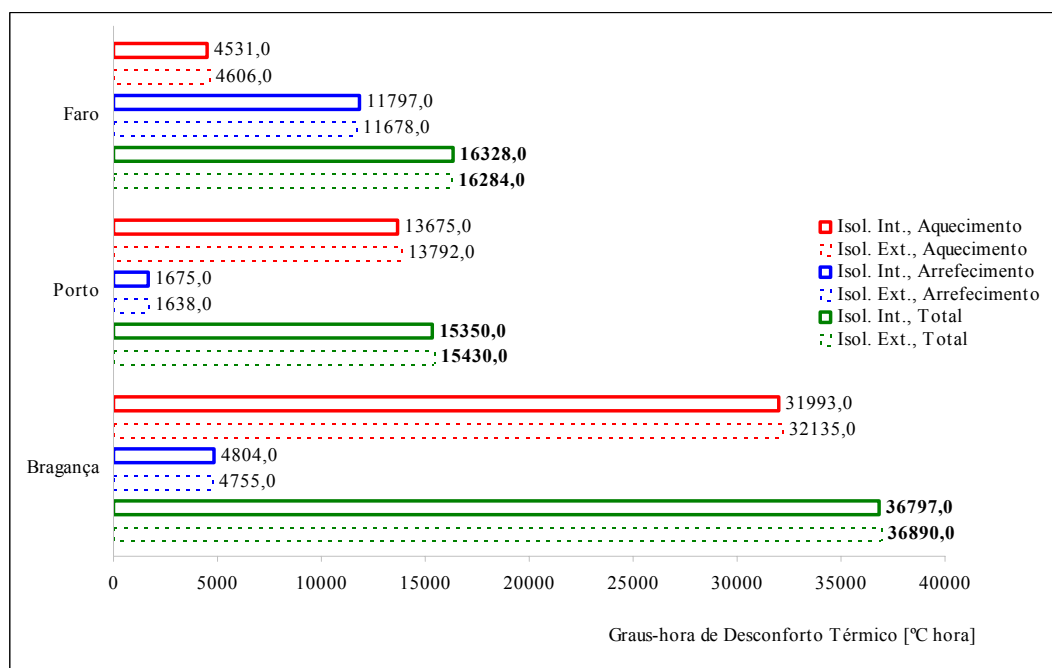


Figura 5.15 – Desconforto térmico global para a situação 1F S 25 24h CV

5.5.4.4 1 FACHADA, COM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 18:00-24:00

Tal como acontecia com a situação da fachada opaca, a restrição da ocupação do espaço das 18:00 às 24:00 origina que as necessidades de aquecimento sejam determinantes nas três cidades e orientações, continuando o sistema interior a demonstrar melhores resultados nas três cidades analisadas, embora de forma menos evidente do que para a situação de fachada opaca, conforme se pode verificar confrontando as Figuras 5.10 e 5.16.

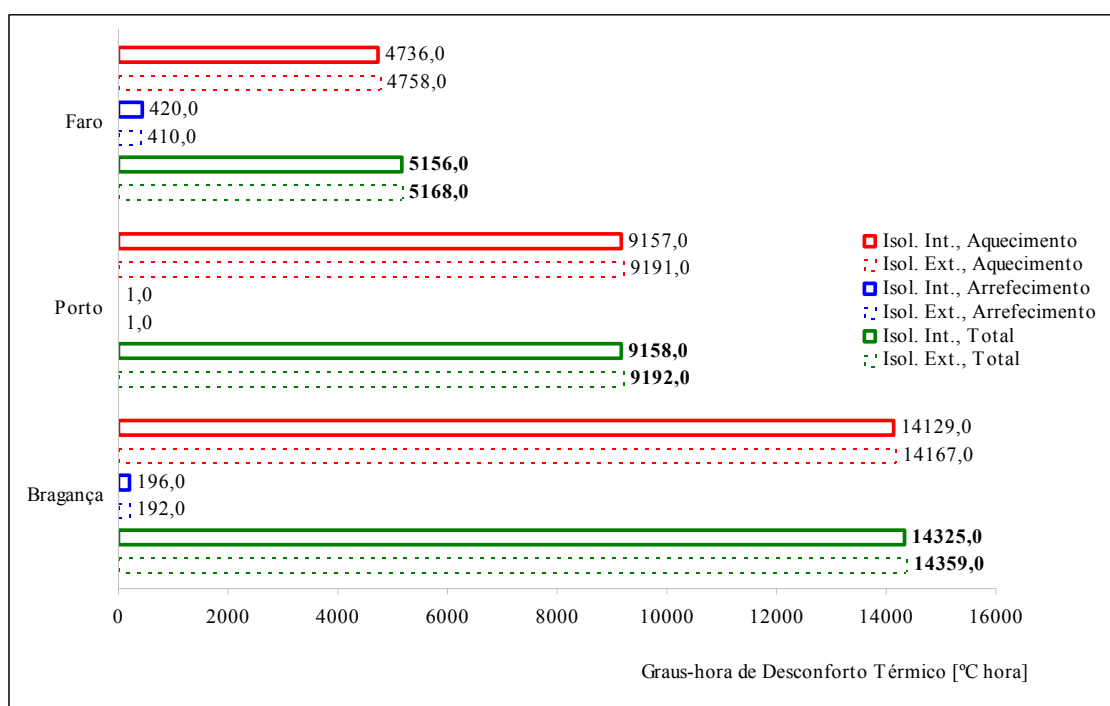


Figura 5.16 – Desconforto térmico global para a situação 1F O 15 6h CV

Com o aumento do factor de forma de 0,15 para 0,25 o desconforto térmico global cresce novamente para as três cidades analisadas em consequência da predominância de temperaturas inferiores ao limite de conforto, determinando ao nível da comparação entre sistemas um incremento da diferença de desempenho a favor do sistema interior.

5.5.4.5 2 FACHADAS, SEM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 00:00-24:00

O desconforto parcial para temperaturas inferiores ao limite definido é naturalmente superior quando comparado com o caso de uma fachada, destacando-se a existência de uma diferença de desempenho entre sistemas tendencialmente superior a favor do sistema interior (comparativamente com uma fachada).

No caso do desconforto parcial para temperaturas superiores ao limite definido verifica-se uma tendência inversa com a diminuição dos valores parciais, continuando a diferença entre sistemas a ser favorável ao sistema exterior mas sem uma variação tão significativa relativamente ao descrito no parágrafo anterior.

Ao nível das cidades analisadas verifica-se que em Faro o sistema interior continua a ser mais desfavorável em todas as orientações, apresentando a maior diferença entre os dois sistemas para o desconforto global. Na cidade do Porto o sistema interior passa a ser ligeiramente mais favorável para as orientações SE e SO (ex. Figura 5.17 para SO), tendência que se manifesta de forma mais notória na cidade de Bragança.

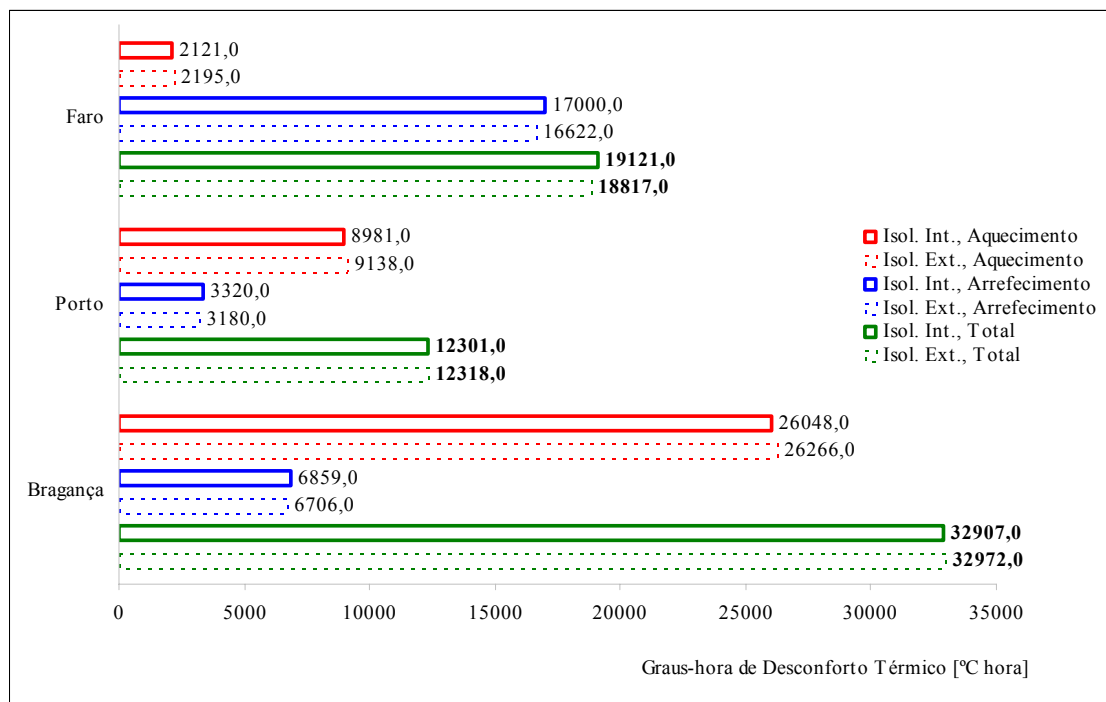


Figura 5.17 – Desconforto térmico global para a situação 2F SO 38 24h SV

Com o incremento do factor de forma para 0,58 a diferença entre os dois sistemas para o desconforto global diminui para a cidade de Faro (continuando o sistema exterior a ser mais favorável em todas as orientações), aumentando para as cidades de Bragança e Porto (ex. Figura 5.18 para SO), para as quais o sistema interior passa a ser mais favorável em todas as orientações estudadas (particularmente para o orientação NO em que o sistema exterior se revelava ligeiramente mais favorável com um factor de forma de 0,38).

Note-se que o desconforto global somente decresce na cidade de Faro, o que significa que nas cidades de Porto e Bragança é condicionante o desconforto parcial associado a temperaturas baixas (factor favorável ao sistema interior).

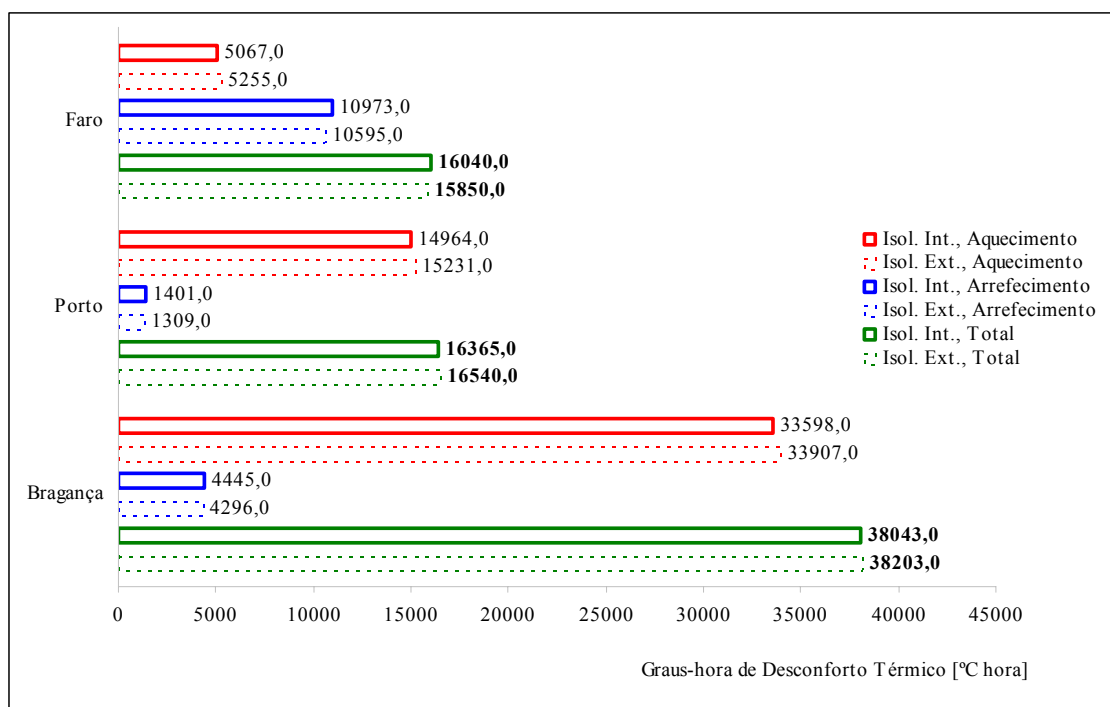


Figura 5.18 – Desconforto térmico global para a situação 2F SO 58 24h SV

Quando comparados com a situação de uma fachada os resultados obtidos confirmam a tendência do sistema interior para garantir melhores condições de conforto térmico nos meses de Inverno e piores nos meses de Verão, passando neste caso o sistema interior a predominar como mais vantajoso particularmente no caso de um factor de forma igual a 0,58 com excepção da cidade de Faro.

5.5.4.6 2 FACHADAS, SEM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 18:00-24:00

No caso da ocupação se restringir ao período 18:00-24:00, verifica-se novamente que o desconforto parcial associado a temperaturas baixas passa a ser preponderante nas três cidades analisadas, aumentando nitidamente a diferença entre os dois sistemas, a favor do interior, comparando com a situação de uma fachada exposta (ex. Figura 5.19 para NE).

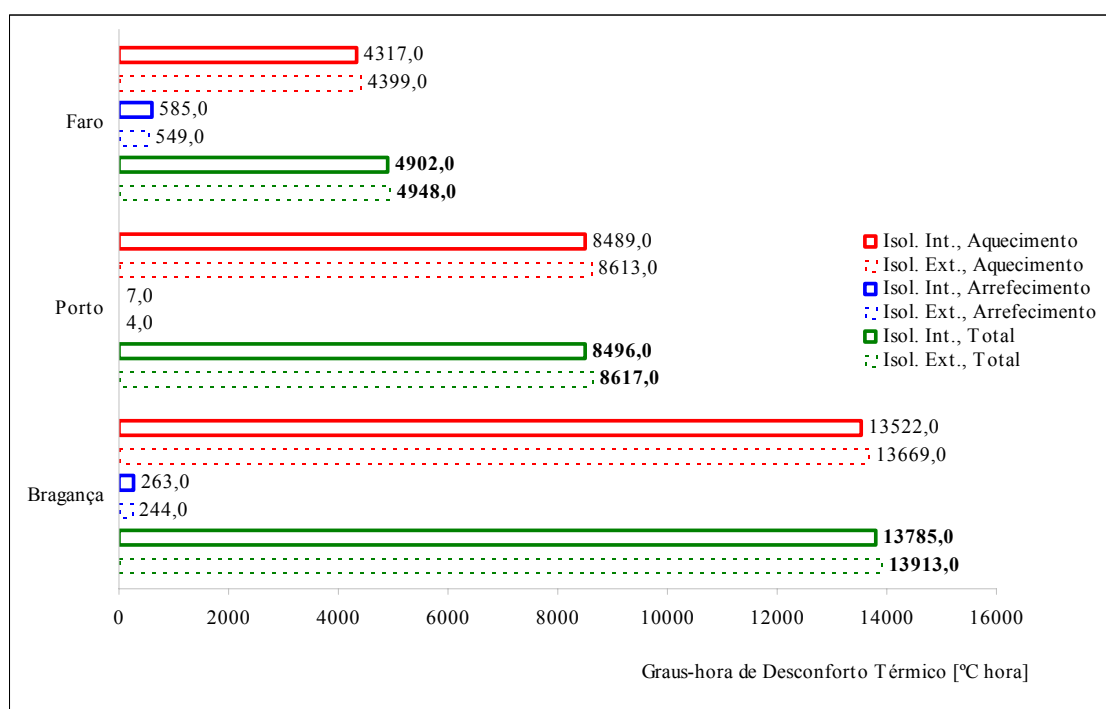


Figura 5.19 – Desconforto térmico global para a situação 2F NE 38 6h SV

É curioso observar que a cidade de Faro, enquanto para um período de 24h apresentava a maior diferença entre os dois sistemas (a favor do exterior), no caso de um período de 6h passa a ter a menor diferença entre sistemas (já a favor do interior).

Com o incremento do factor de forma para 0,58 adensa-se a diferença entre os dois sistemas, confirmando a mesma tendência já verificada em casos anteriores.

Para este período de utilização, o sistema interior apresenta um melhor comportamento, independentemente da orientação, cidade, ou factor de forma.

5.5.4.7 2 FACHADAS COM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 00:00-24:00

A existência de vãos envidraçados traduz-se para a cidade de Faro numa diminuição da diferença ao nível do desconforto global entre os dois sistemas, continuando o sistema exterior a revelar-se mais eficaz em todas as orientações.

Já para as cidades do Porto e Bragança a diferença ao nível do desconforto global entre os dois sistemas aumenta em prol do sistema interior, que passa a ser o sistema com melhor desempenho para todas as orientações, com excepção da orientação NO em Bragança onde os resultados são praticamente equivalentes (refira-se particularmente a orientação NO na cidade do Porto, na qual sem vãos envidraçados o sistema exterior revelava ser mais eficaz, tal como se ilustra nas Figuras 5.20 e 5.21).

A estas constatações não é naturalmente alheio o facto do desconforto global diminuir em Faro para todas as orientações, aumentando nas cidades do Porto e Bragança igualmente em todas as orientações com a presença de envidraçados, ilustrando assim o aumento relativo das necessidades de aquecimento.

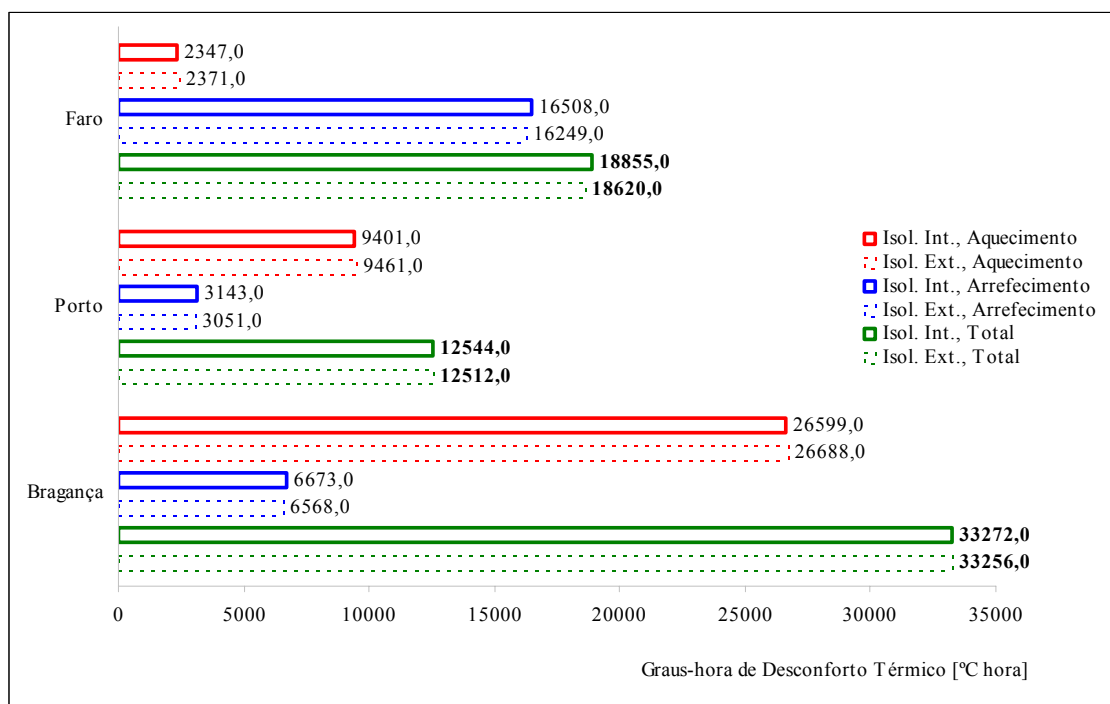


Figura 5.20 – Desconforto térmico global para a situação 2F NO 38 24h SV

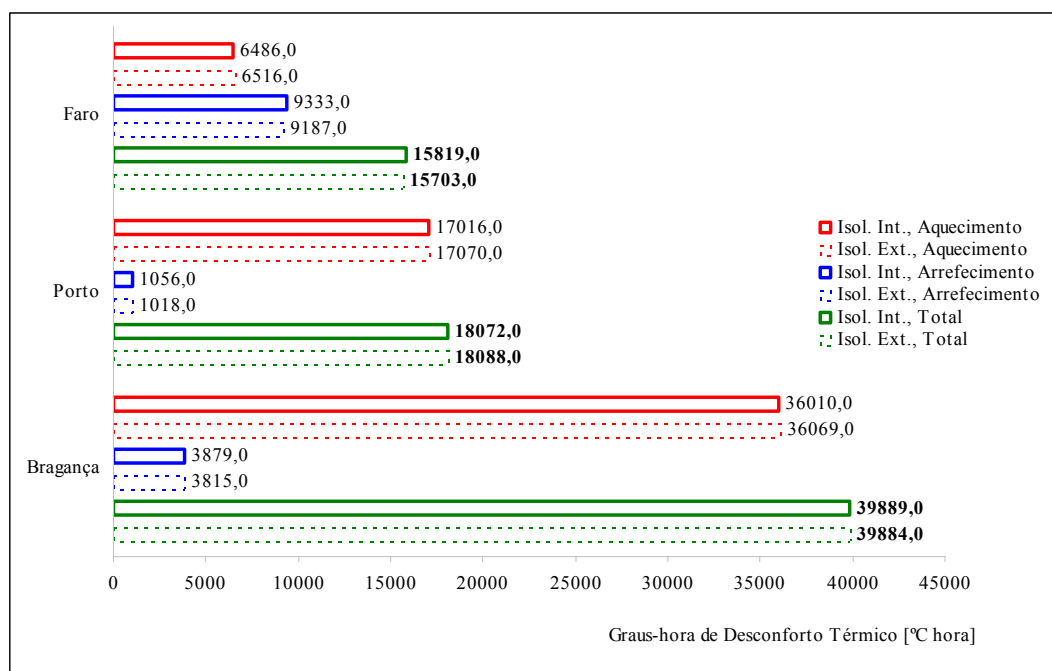


Figura 5.21 – Desconforto térmico global para a situação 2F NO 38 24h CV

Com o incremento do factor de forma de 0,38 para 0,58 (Figuras 5.21 e 5.22), Faro é a única cidade cuja diferença entre sistemas ao nível do desconforto global diminui em consequência do melhor desempenho do sistema interior. No Porto e em Bragança a diferença entre sistemas aumenta em favor do sistema interior.

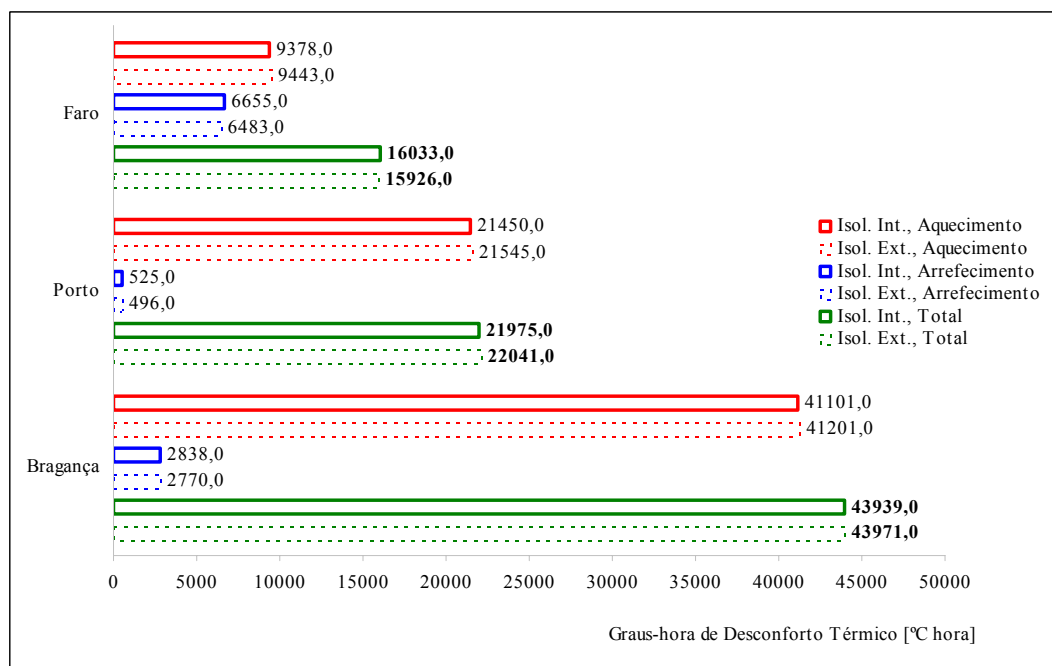


Figura 5.22 – Desconforto térmico global para a situação 2F NO 58 24h CV

5.5.4.8 2 FACHADAS COM VÃOS ENVIDRAÇADOS, OCUPAÇÃO 18:00-24:00

A restrição do período de ocupação possui um efeito particularmente notório na cidade de Faro, para a qual o sistema interior passa a ser mais favorável em todas as orientações (ex. Figura 5.23 para NO). É ainda interessante notar que a diferença a favor do sistema interior cresce em todas orientações e cidades quando comparada com a situação de uma fachada.

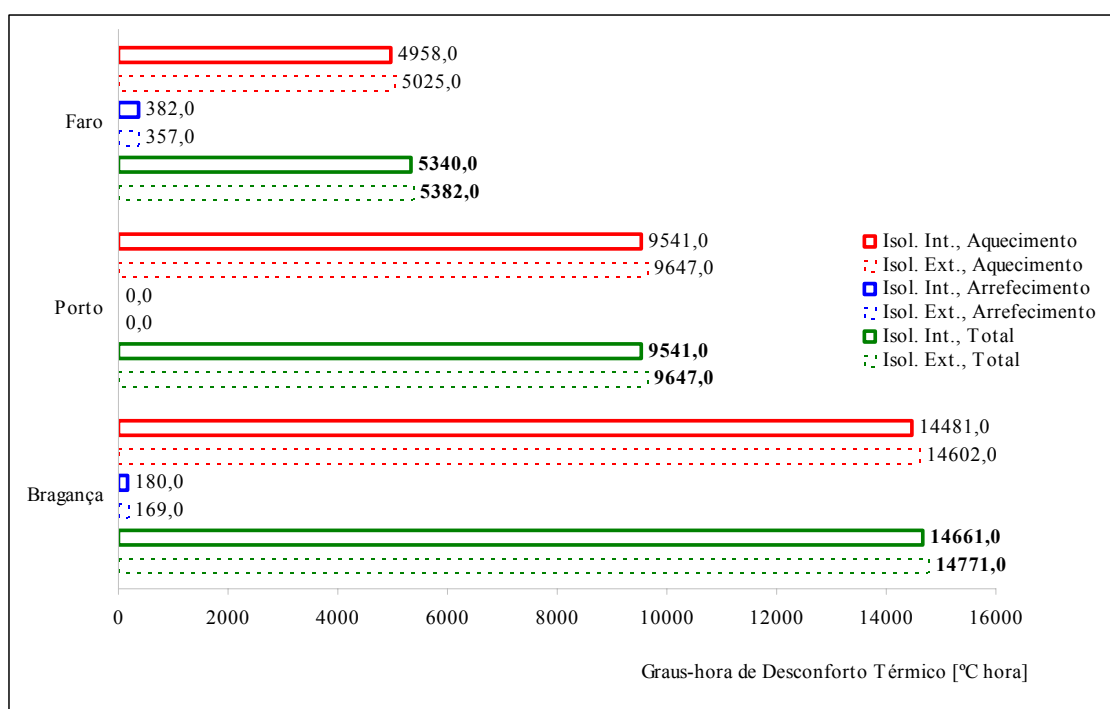


Figura 5.23 – Desconforto térmico global para a situação 2F NO 38 6h CV

Comparando a situação de duas fachadas expostas sem e com vãos envidraçados verifica-se que, tal como no caso de uma fachada, a diferença global entre sistemas diminui em todas as cidades e orientações com a sua presença .

Tal como havia sido verificado em casos anteriores, com o incremento do factor de forma para 0,58 adensa-se a diferença entre os dois sistemas a favor do sistema interior, ainda com maior veemência do que no caso de uma fachada com vãos envidraçados.

5.5.4.9 SÍNTESE DE CONCLUSÕES

A análise dos pontos anteriores permite reunir um conjunto de conclusões que resumem os principais resultados deste capítulo:

- Relativamente aos parâmetros utilizados na caracterização do comportamento térmico em regime dinâmico de uma solução construtiva opaca, a opção por um sistema interior (quando comparada com um sistema exterior equivalente) reduz ligeiramente o atraso térmico φ e também o amortecimento térmico f (o que corresponde a aumentá-lo numericamente), o que poderá constituir na prática uma desvantagem, embora algo ténue em face da multiplicidade de factores que determinam o desempenho térmico de um edifício;
- A admitância térmica Y de um sistema interior é já substancialmente inferior à de um sistema exterior equivalente, o que pode constituir uma vantagem do sistema para certas condições, tal como foi demonstrado pelos resultados apresentados;
- Demonstra-se que o sistema interior melhora o seu desempenho relativamente ao sistema exterior com a preponderância das necessidades de aquecimento, tendência observada na totalidade das simulações realizadas;
- Com o incremento do factor de forma o desconforto global tende a ser mais influenciado pelo desconforto parcial associado a temperaturas baixas, aspecto que favorece a utilização do sistema interior (aspecto particularmente perceptível para o período de ocupação 18:00-24:00);
- O período de ocupação com necessidades de conforto térmico é um parâmetro fundamental na avaliação do conforto térmico dum compartimento, influenciando a decisão sobre o tipo de sistema mais adequado;
- No caso da utilização com necessidades de conforto térmico se restringir ao período de ocupação 18:00-24:00 a utilização do sistema interior é francamente favorável, permitindo um aproveitamento mais eficaz dos ganhos internos e não estando tão vulnerável ao problema do sobreaquecimento;

- Melhor desempenho do sistema exterior em Faro onde mesmo considerando apenas o período de ocupação 18:00-24:00 a adopção do sistema interior resulta numa vantagem que se pode considerar desprezável (para uma fachada);
- No caso de duas fachadas a adopção do sistema interior pode ser já justificável em Faro para uma ocupação de 6 horas, sobretudo com um factor de forma de 0,58; no entanto, e atendendo às suas características climáticas, a adopção de um sistema interior poderá ser problemática em face do risco de sobreaquecimento;
- Melhor desempenho do sistema interior nas cidades de Porto e Bragança, inclusive para uma ocupação de 24 horas no caso de duas fachadas expostas;
- A introdução de vãos envidraçados tende a aproximar o desempenho dos dois sistemas ao nível do desconforto global;
- A observação de um melhor desempenho global do sistema interior não significa que o problema do sobreaquecimento seja inexistente, pelo que se recomenda uma protecção adequada dos vãos envidraçados e um sistema de ventilação eficaz;
- O sistema exterior apresenta sempre um melhor desempenho no que respeita à probabilidade de ocorrência de sobreaquecimento;
- A influência da variação da admitância térmica da envolvente interior pode ser superior à do sistema de isolamento térmico propriamente dito (ex. uma parede interior em gesso cartonado com material isolante térmico na caixa de ar possui um valor de Y da ordem de $0,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), pelo que importa considerar não só o desempenho dos elementos exteriores mas igualmente dos elementos interiores;
- A introdução do sistema de isolamento térmico pelo interior não constitui por si só um óbice à obtenção de condições adequadas de conforto térmico em edifícios residenciais nas condições de utilização efectivas definidas neste trabalho.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Apresenta-se neste capítulo uma síntese das principais conclusões e considerações tecidas ao longo da análise efectuada, de uma forma necessariamente sucinta de modo a não o tornar redundante face ao corpo principal do trabalho, recomendando-se a consulta dos demais capítulos que o constituem para um aprofundamento dos respectivos temas.

Complementarmente são sugeridas diversas hipóteses para desenvolvimentos científicos futuros em função dos resultados obtidos.

6.1 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao nível da análise tecnológica dos sistemas existentes, salientam-se os seguintes aspectos:

- A variedade de soluções de isolamento térmico pelo interior disponíveis no mercado traduz-se numa enorme flexibilidade de aplicação para as mais diversas situações e tipos de obra, seja em reabilitação ou em construção nova;
- A sua utilização contribui para a eliminação da necessidade de embeber tubagens ou infra-estruturas similares no seio das alvenarias, permitindo evitar algumas consequências negativas associadas a tal procedimento, como o enfraquecimento da rigidez da parede e da aderência entre a argamassa das juntas e os elementos que a constituem, e a criação de vazios necessitando ser preenchidos com argamassa, originando zonas mal preenchidas com transições bruscas de secção podendo originar fissuração nos revestimentos [23];
- A eficácia da sua utilização implica uma melhoria na concepção, especificação tecnológica e pormenorização construtiva das paredes exteriores, sobretudo em pontos singulares tais como zonas de vãos e caixas de estores, ligações à estrutura e cobertura, cunhais, cargas concentradas, entre outros;

- É necessário proceder à formação profissional da mão-de-obra para a aplicação dos sistemas, no sentido de dominarem as técnicas já validadas pelos principais fabricantes e as condições para uma correcta aplicação em obra;
- É necessário proceder à formação profissional dos projectistas, no sentido de conhecerem as vantagens e limitações dos vários tipos de sistemas existentes, incluindo a grande diversidade de componentes associados;
- Recomenda-se a adopção exclusiva de sistemas ratificados por um documento de referência para uma dada finalidade;
- Igualmente importante para a garantia de um adequado funcionamento em fase de utilização dos edifícios será a aplicação de um sistema “completo” relativamente aos diversos componentes que o constituem.

Ao nível da análise da influência do sistema na probabilidade de ocorrência de condensações internas, salientam-se os seguintes aspectos:

- A utilização de um sistema de isolamento térmico interior não implica *de per se* a necessidade de integração de uma barreira pára-vapor, desde que sejam garantidas condições adequadas de ventilação e temperatura interior, bem como ponderada a resistência à difusão de vapor e a resistência térmica do material isolante térmico;
- A zona climática I3 é particularmente desfavorável neste domínio, sendo que a garantia de uma higrometria máxima interior de 3 g/m^3 não é suficiente para evitar a existência de condensações internas com espessuras de material isolante térmico elevadas, no caso de se tratar de um material com um valor elevado do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água (ex. lã de rocha), mesmo considerando uma temperatura interior de $20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Constatou-se a influência benéfica associada à diminuição do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material isolante térmico na redução da probabilidade de ocorrência de condensações internas;

- Todavia, a utilização de materiais isolantes com reduzida permeabilidade ao vapor de água somente deve ser adoptada como estratégia para evitar o recurso a uma barreira pára-vapor, visto resultar na diminuição da permeabilidade ao vapor de água da envolvente exterior, o que, em última análise, poderá aumentar a probabilidade de ocorrência de condensações superficiais;
- À utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior deverá assim estar sempre associada uma adequada estratégia de ventilação do edifício.

Ao nível da análise da influência do sistema na gravidade associada à ocorrência de pontes térmicas, salientam-se os seguintes aspectos:

- A avaliação de uma solução construtiva no domínio das pontes térmicas deve englobar quer a probabilidade de ocorrência de condensações superficiais (condições de habitabilidade) quer a quantificação do acréscimo de perda térmica para o exterior (condições de sustentabilidade);
- Na generalidade das configurações construtivas estudadas é recomendável uma intervenção de correcção;
- A zona climática I3 é naturalmente mais susceptível no que respeita à potencial ocorrência de condensações superficiais, recomendando-se a intervenção para todas as configurações construtivas com a (eventual) excepção das ligações entre uma parede exterior e uma parede interior, e entre uma parede exterior com uma laje de pavimento intermédio;
- No extremo oposto encontra-se a zona climática I1, onde somente na ligação entre duas paredes exteriores com pilar não confinado se revela ser desejável a intervenção no âmbito das condições de habitabilidade;
- De todo o modo, demonstra-se para a vertente habitabilidade que a utilização do sistema com as intervenções de correcção sugeridas não implica um risco de ocorrência de condensações superficiais, desde que sejam obviamente garantidas as condições de ventilação e aquecimento adequadas;

- Na vertente sustentabilidade observa-se que a generalidade das configurações construtivas estudadas justifica uma intervenção de correcção, revelando-se viável com a sua implementação a limitação da perda térmica para o exterior a valores que não comprometem a utilização do sistema;
- Constatou-se ser fundamental a ausência de erros na aplicação do sistema ao nível da não continuidade do material isolante térmico em pontos singulares, tais como na ligação entre duas paredes exteriores ou no caso da existência de um pilar em zona corrente da parede exterior;
- Recomendam-se intervenções de cariz tecnológico ao nível das ligações com a caixa de estore e a caixilharia no sentido de desprezar na prática o efeito das pontes térmicas neste tipo de situações.

Ao nível da análise da influência do sistema nas variações de temperatura da parede exterior, salientam-se os seguintes aspectos:

- As solicitações de natureza térmica a que se encontra sujeita a parede exterior são, para determinadas condições, notoriamente superiores com a utilização do sistema interior quando comparadas com o sistema exterior;
- A orientação da parede exterior (designadamente a variação da exposição à radiação solar) possui um papel fundamental na magnitude da solicitação, constatando-se que esta possui pouca significância no caso de uma fachada com orientação Norte (mesmo considerando um valor de 0,70 para o coeficiente de absorção solar do revestimento exterior);
- Para fachadas mais expostas à radiação solar a amplitude térmica máxima aumenta consideravelmente atingindo com o sistema interior variações máximas sazonais (Verão) da ordem dos 34 °C e anuais da ordem dos 45 °C para uma fachada orientada a Poente, admitindo um valor de 0,70 para o coeficiente de absorção solar do revestimento exterior;

- Verificou-se para o sistema interior uma redução da amplitude térmica máxima (quer sazonal quer anual) de cerca de 10 °C com a diminuição do coeficiente de absorção solar do revestimento exterior de 0,70 para 0,30, o que demonstra a importância da consideração do seu efeito;
- O aumento da espessura do material isolante térmico possui um efeito prejudicial no caso do sistema interior, originando um prolongamento da espessura de parede sujeita a amplitudes térmicas elevadas; no caso do sistema exterior o seu efeito é benéfico, verificando-se uma redução da amplitude térmica máxima;
- Enquanto para o sistema exterior a solicitação máxima num dia de Inverno revela ser desprezável, para o sistema interior o seu valor apenas pode ser considerado reduzido para um coeficiente de absorção solar do revestimento exterior de 0,30;
- A utilização do sistema de isolamento térmico pelo interior implica cuidados na avaliação da resistência da parede exterior às solicitações de natureza térmica, recomendando-se a adopção das soluções construtivas mínimas já conhecidas, ou um estudo detalhado para soluções não tradicionais.

Finalmente ao nível da análise da influência do sistema nas condições de conforto térmico em edifícios residenciais destacam-se os seguintes aspectos:

- A avaliação de desempenho desenvolvida não corrobora o preconceito existente na indústria da construção nacional de que a implementação de um sistema de isolamento térmico pelo interior deve ser sempre evitada;
- A consideração de parâmetros dinâmicos de caracterização térmica de elementos construtivos é determinante na avaliação do conforto térmico em edifícios, destacando-se neste trabalho a importante influência da admitância térmica;
- Os parâmetros desfasamento térmico e amortecimento térmico para a solução de isolamento térmico pelo interior demonstram que a inércia térmica de transmissão é somente ligeiramente afectada quando comparada com uma solução equivalente aplicada pelo exterior;

- A definição de um período de ocupação de um compartimento/edifício com necessidades de conforto térmico é fundamental para a avaliação da eficácia de uma determinada envolvente construtiva;
- A utilização do sistema interior revela ser mais eficiente para zonas climáticas onde imperem as necessidades de aquecimento, e particularmente para situações onde importa aproveitar rapidamente o efeito de ganhos de calor internos, como se demonstrou para o período de fim da tarde/início de noite (18:00-24:00);
- O desconforto térmico associado a temperaturas elevadas é superior no sistema de isolamento térmico pelo interior, pelo que se recomenda a adopção de medidas que possam minimizar esta desvantagem, designadamente ao nível da protecção dos vãos envidraçados, da ventilação interior, e da admitância térmica dos demais elementos construtivos/revestimentos;
- O efeito da variação da admitância térmica da envolvente construtiva interior pode ser mais relevante do que o tipo de sistema de isolamento térmico propriamente dito, particularmente com a tendência de utilização de soluções leves para a compartimentação interior dos edifícios residenciais;
- É expectável que a combinação de um sistema de aquecimento intermitente com uma admitância térmica interior adequada possa contribuir para um usufruto mais racional dos recursos energéticos por parte dos utilizadores dos edifícios;
- Em Portugal, nos edifícios residenciais, é menos vulgar o recurso a sistemas de arrefecimento ambiente durante os meses do Verão, embora seja notória uma tendência para o seu crescimento; a variação da admitância térmica interior em consequência da utilização de um sistema de isolamento térmico pelo interior deverá assim ser acompanhada de uma perspectiva integrada do desempenho térmico de toda a envolvente construtiva exterior e interior, sob pena de reforçar, sobretudo nos edifícios de ocupação contínua durante o dia, a referida tendência para a utilização de equipamentos de ar condicionado.

6.2 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Destacam-se as seguintes possíveis áreas de investigação complementares neste domínio:

- Analisar somente a questão energética mediante o recurso a uma ferramenta de cálculo mais sofisticada, robustecida por um maior detalhe na definição dos padrões de utilização térmica em edifícios residenciais (recorrendo por ex. ao tratamento de dados reais de contadores de consumo energético);
- Incluir uma análise similar à desenvolvida no presente trabalho para outros períodos de ocupação em função da utilização efectiva com necessidades de conforto térmico em edifícios residenciais (ex. 7:00-24:00);
- Avaliar a viabilidade de integração de sistemas de isolamento térmico pelo interior noutros tipos de edifícios (ex. escolares), para os quais os padrões de utilização térmica possam ser mais facilmente identificáveis;
- Implementar dispositivos de monitorização de temperatura interior em edifícios com soluções de isolamento térmico pelo interior e pelo exterior, e proceder a uma análise comparativa entre o comportamento de ambas as situações em função dos diversos parâmetros identificados neste trabalho, incluindo uma avaliação da influência dos ganhos internos e das condições de ventilação;
- Procurar estender o tipo de análise desenvolvida neste trabalho (para um único compartimento, isto é, uma única zona térmica com necessidades de conforto) para um edifício com diversas zonas térmicas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] EUROCONSTRUCT, *Press Release da 58.ª Conferência*, ITIC (Instituto Técnico para a Indústria da Construção), 2004;
- [2] EUROCONSTRUCT, *Press Release da 60.ª Conferência*, Barcelona, 2005;
- [3] DIRECÇÃO GERAL DE ENERGIA, *Eficiência Energética nos Edifícios*, Lisboa, 2002;
- [4] ECOFYS, *Mitigation of CO₂ – Emissions from the Building Stock. Beyond the EU Directive on the Energy Performance of Buildings*, Colónia, 2004;
- [5] MINISTÉRIO DA ECONOMIA, *Eficiência Energética e Energias Endógenas – Resolução do Conselho de Ministros n.º 154/2001 de 27 de Setembro*, Lisboa, 2001;
- [6] DECRETO-LEI n.º 40/90, *Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios*, 6 de Fevereiro de 1990;
- [7] NF P75-101 (Norme Française), *Isolants Thermiques Destinés au Bâtiment. Définition*, 1983;
- [8] ALVES, S.; SOUSA, H., *Paredes Exteriores de Edifícios em Pano Simples*, LIDEL, Lisboa, 2003;
- [9] DIRECÇÃO GERAL DE GEOLOGIA E ENERGIA, *Reabilitação Energética da Envolvente de Edifícios Residenciais*, Lisboa, 2004;
- [10] DIRECTIVA 89/106/CEE, *Directiva do Conselho de 21 de Dezembro de 1988 publicada no JO L 40 de 11/02/89 relativa à aproximação das disposições legislativas, regulamentares e administrativas dos Estados-membro no que respeita aos produtos de construção, modificada pela directiva 93/68/CE publicada no JO L 220 de 30/08/93*;
- [11] ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie), *L'Isolation Thermique: Les Maisons Individuelles Gagnent en Confort*, Paris, 2001;
- [12] ANAH (Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat), *Fiche Technique: Confort Thermique*, Paris, 2004;
- [13] CHARBONNIER, S. et al, *Guide de la Thermique dans l'Habitat Neuf – Bâtir une Stratégie Globale*, Le Moniteur, Paris, 1992;

- [14] APPLETON, J., *Reabilitação de Edifícios Antigos – Patologias e Tecnologias de Intervenção*, Orion, 2003;
- [15] FREITAS, V., *Isolamento Térmico de Fachadas pelo Exterior – Reboco Delgado Armado sobre Poliestireno Expandido (ETICS)*, OPTIROC Portugal – Cimentos e Argamassas, Lda. (Sistema “Serpotherm”), Porto, 2002;
- [16] BARREIRA, E., *Aplicação da Termografia ao Estudo do Comportamento Higrotérmico dos Edifícios*, Dissertação submetida para a satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Construção de Edifícios da FEUP, Porto, 2004;
- [17] RT2000, *Arrête du 29 Novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*, J.O. Numéro 277 du 30 Novembre 2000 page 19049, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, França, 2000;
- [18] PINTO, M., *Metodologia para a Definição Exigencial de Isolantes Térmicos*, Dissertação submetida para a satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Construção de Edifícios da FEUP, Porto, 1996;
- [19] CERTIFICAT CSTBAT, *Complexes et Sandwiches d'Isolation Thermique – Règlement Technique*, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Paris, 2003;
- [20] DTU 20.1 (Document Technique Unifié), *Parois et Murs en Maçonnerie de Petits Eléments. Annexe – Guide pour le Choix des Types de Murs de Façade en Fonction du Site*, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Paris, 1985;
- [21] FREITAS, V.; PINTO, P., *Nota de Informação Técnica (NIT) 002. Permeabilidade ao Vapor de Materiais de Construção. Condensações Internas*, Laboratório de Física das Construções – FEUP, Porto, 1998;
- [22] PINTO, P., *Caracterização de Barreiras Pára-Vapor e sua Aplicação*, Dissertação submetida para a satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Construção de Edifícios da FEUP, Porto, 2002;
- [23] CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO et al, *Manual de Alvenaria de Tijolo*, Associação Portuguesa de Cerâmica, Coimbra, 2000;
- [24] SANTOS, C.; PAIVA, J., *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*, Informação Técnica Edifícios n.º 28, LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil), Lisboa, 2001;

-
- [25] DTU 25.42 (Document Technique Unifié), *Ouvrages de Doublage et Habillage en Complexes et Sandwiches – Plaques de Parement en Plâtre-isolant*, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Paris, 1993;
- [26] CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), *Le Mur Manteau: Protection Hygrothermique du Gros œuvre des Bâtiments*, Cahiers du CSTB, Paris;
- [27] DECRETO-LEI n.º 80/2006, *Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios*, 4 de Abril de 2006;
- [28] EN ISO 10211-1, *Thermal Bridges in Building Construction. Heat Flows and Surface Temperatures. Part 1: General Calculation Methods*, 1995;
- [29] OFEN (Office Fédéral de l’Energie), *Catalogue des Ponts Thermiques*, Berna, 2003;
- [30] WOUTERS, P et al, *Practical Guide for the Hygrothermal Evaluation of Thermal Bridges*, Save-Kopractice – Project Document, 2003
- [31] CORVACHO, M., *Nota de Informação Técnica (NIT) 003. Catálogo de Pontes Térmicas*, Laboratório de Física das Construções – FEUP, Porto, 1999;
- [32] CORVACHO, M., *Pontes Térmicas – Análise do Fenómeno e Propostas de Soluções*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto, 1996;
- [33] ABREU, M., *Correcção de Pontes Térmicas em Intervenções de Reabilitação*, Dissertação submetida para a satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Construção de Edifícios da FEUP, Porto, 2004;
- [34] EN ISO 13788, *Hygrothermal Performance of Building Components and Building Elements. Estimation of Internal Surface Temperature to Avoid Critical Surface Humidity and Interstitial Condensation – Calculation Methods*, 2001;
- [35] ABNT – PROJETO 02:135.07-001, *Desempenho Térmico de Edificações. Parte 1: Definições, Símbolos e Unidades*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003;
- [36] ISO 13786 (Draft), *Thermal Performance of Building Components. Dynamic Thermal Characteristics – Calculation Methods*, 2004;
- [37] SIDLER, O., *Logements a Faibles Besoins en Energie – Guide de Recommandations et d’Aide à la Conception*, ADEME (Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie), França, 2000;
- [38] CIBSE (The Chartered Institution of Building Services Engineers), *Environmental Design Guide A*, Londres, 1999;

- [39] TUREGANO, J. et al, *La Inercia Térmica de los Edificios y su Incidencia en las Condiciones de Confort como Refuerzo de los Aportes Solares de Carácter Pasivo*, Revista Conarquitectura n.º 8, Espanha, 2003;
- [40] PÔLE CONSTRUCTION, *L’Inertie Thermique dans la Conception*, Montpellier, 2003;
- [41] FREITAS, V.; PINTO, M., *Nota de Informação Técnica (NIT) 001. Metodologia para a Seleção Exigencial de Isolantes Térmicos*, Laboratório de Física das Construções – FEUP, Porto, 1997;
- [42] ECOFYS, *The Contribution of Mineral Wool and other Thermal Insulation Materials to Energy Saving and Climate Protection in Europe*, Colónia, 2002;
- [43] NF P01-010 (Norme Française), *Qualité Environnementale des Produits de Construction – Déclaration Environnementale et Sanitaire des Produits de Construction*, 2004;
- [44] SNPA (Syndicat National des Plastiques Alvéolaires), *Caractéristiques Environnementales et Sanitaires Suivant la Norme XP P01-010 – Complexe de Doublage d’Isolation Thermique PSE Th 38 Épaisseur 10+80*, Paris, 2004;
- [45] DECRETO-LEI n.º 64/90, *Segurança contra Incêndio em Edifícios de Habitação*, 21 de Fevereiro de 1990;
- [46] CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO et al, *Manual de Aplicação de Revestimentos Cerâmicos*, Associação Portuguesa de Cerâmica, Coimbra, 2003;
- [47] ATEDY (Asociación Técnica y Empresarial del Yeso), *Sistemas Constructivos con Placa de Yeso Laminado – Sistemas de Trasdosados*, Madrid, 2001;
- [48] EN ISO 12354-1, *Building Acoustics. Estimation of Acoustic Performance in Buildings from the Performance of Elements. Part 1: Airborne Sound Insulation Between Rooms*, 2000;
- [49] CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), *Rapport D’Essais n.º 713-960-003. Indice d’Affaiblissement Acoustique R d’un Voile de Béton Avec un Doublage – Rockwool Labelrock 406.110*, Paris, 1996;
- [50] MEISSER, M., *L’Acoustique du Bâtiment par L’Exemple*, Le Moniteur, Paris, 1994;
- [51] CATED (Centre d’Assistance Technique et de Documentation), *Amélioration Acoustique des Logements Existants*, França, 1999;
- [52] PROMO PSE (Association pour la Promotion du Polystyrène Expansé dans la Construction), *Le Guide de l’Isolation Thermique et Acoustique dans la Construction*, Paris, 2006;

-
- [53] PROMO PSE (Association pour la Promotion du Polystyrène Expansé dans la Construction), *ABCDaire de l'Isolation (Focus 3)*, Paris, 2003;
- [54] WEBER, L. et al, *Influence of Wall Construction on the Acoustical Behaviour of ETHICS*, IBP (Fraunhofer Institute of Building Physics), Estugarda, 2002;
- [55] ACERMI (Association pour la Certification des Matériaux Isolants), *Isolants Thermiques Manufactures – liste n° 04-19 des certificats en cours de validité au 25 mars 2004*, Paris, 2004;
- [56] TANIGUTI, E., *Método Construtivo de Vedação Vertical Interna de Chapas de Gesso Acartonado*, Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia, São Paulo, 1999;
- [57] PLADUR, *Catálogo Técnico*, 2004;
- [58] DH 748 (Documento de Homologação), *IBERPLACO – Sistemas de Revestimento Interior de Paredes e Tectos Contínuos*, LNEC, Lisboa, 2004;
- [59] AVIS TECHNIQUE 9/02-744, *Société LAFARGE PLATRES – Prégystyrène SB et Prégystyrène Th-SB*, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Paris, 2003;
- [60] BPB/IBERPLACO, *Catálogo Técnico*, 2004;
- [61] NORMA UNE 102.023-83, *Placas de Cartón-Yeso – Condiciones Generales e Especificaciones*, Madrid, 1983;
- [62] NORMA UNE 102.035-83, *Placas de Cartón-Yeso – Métodos de Ensayo*, Madrid, 1983;
- [63] NF P72-302 (Norme Française), *Plaques de Parement en Plâtre – Définition, Spécification et Essais*, 1981;
- [64] AVIS TECHNIQUE 9/00-697, *ROCKWOOL ISOLATION SA – Labelrock*, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Paris, 2003;
- [65] DTU 25.41 (Document Technique Unifié), *Ouvrages en Plaques de Parement en Plâtre – Plaques à Faces Cartonées – Partie 1: Cahier des charges*, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Paris, 1993;
- [66] ISO 6241, *Performance Standards in Building – Principles for their Preparation and Factors to be Considered*, 1984;
- [67] SOUSA, H., *Apontamentos da Disciplina de Construções em Alvenaria*, Mestrado em Construção de Edifícios da FEUP, Porto, 2003;

- [68] FREITAS, V., *Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios – Análise do Fenómeno da Interface*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto, 1993;
- [69] LOUVIGNE, M., *Humidité dans les Bâtiments – Prévention et Traitement*, CATED (Centre d'Assistance Technique et de Documentation), França, 2000;
- [70] HOLM, A. et al, *Understanding the Hygrothermal Behaviour of a Building Envelope by Using an Advanced Model (WUFI)*, 1.º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, FEUP, Porto, 2003;
- [71] ISO 7730, *Moderate thermal environments – Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, 1994;
- [72] EN ISO 10211-2, *Thermal Bridges in Building Construction – Calculation of Heat Flows and Surface Temperatures – Part 2: Linear Thermal Bridges*, 2001;
- [73] ISO 6946, *Building Components and Building Elements. Thermal Resistance and Thermal Transmittance – Calculation Method*, 1996;
- [74] MENDES DA SILVA, J., *Alvenarias Não Estruturais – Patologias e Estratégias de Reabilitação*, Seminário sobre Paredes de Alvenaria, P.B. Lourenço & H. Sousa (Eds.), Porto, 2002;
- [75] SÁ, R., *Apontamentos da Disciplina de Gestão Energética Ambiental do Espaço Construído*, Mestrado em Construção de Edifícios da FEUP, Porto, 2002;
- [76] ECOTECT, *Manual de Utilização do Programa – Versão 5.2*, 2005;
- [77] YANNAS, S. et al, *Environmental Performance of Buildings – A comparative study of building materials and construction techniques in Turkey*, Report Summary for the Britain-Turkey Partnerships Programme, 2002/2003;
- [78] TAYLOR, N., *Energy Efficiency for Everyone: Analysis and Development of an Energy Efficient Project Home*, The University of Western Australia, 2002;
- [79] HENSEN, J. et al, *Some Quality Assurance Issues and Experiences in Teaching Building Performance Simulation*, Technische Universiteit Eindhoven, Center for Buildings & Systems TNO, Holanda, 2004;
- [80] FERREIRA, M., *Caudais de Ventilação Recomendados para Edifícios Residenciais: Impacto ao Nível do Conforto Térmico e do Consumo de Energia para Aquecimento*, Dissertação submetida para a satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Construção de Edifícios da FEUP, Porto, 2004;

- [81] LANZINHA, J., *Propriedades Higrotérmicas de Materiais de Construção*, Dissertação de Mestrado, FCTUC, Coimbra, 1998;
- [82] ABNT – PROJETO 02:135.07-001/2, *Desempenho Térmico de Edificações. Parte 2: Métodos de Cálculo da Transmitância Térmica, da Capacidade Térmica, do Atraso Térmico e do Fator Solar de Elementos e Componentes de Edificações*, ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 2003.

ANEXO I

SÍNTESE DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS, HÍGRICAS E FÍSICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS NAS SIMULAÇÕES

PROPRIEDADES TÉRMICAS

Coefficiente de condutibilidade térmica, λ

Quantidade de calor que atravessa perpendicularmente um provete de um material, com faces planas e paralelas, por unidade de tempo e espessura, quando sujeito a um gradiente de temperatura unitário entre faces. Expressa-se habitualmente em $[W/(m \cdot ^\circ C)]$, [21].

Material	λ [W/(m·°C)]	Referência
Reboco à base de ligantes hidráulicos	1,150	[24]
Cerâmica de barro vermelho	1,150	[24]
Alvenaria de tijolo cerâmico vazado de 11 cm ⁱ⁾	0,524	[24]
Alvenaria de tijolo cerâmico vazado de 22 cm ⁱ⁾	0,478	[24]
Argamassa de inertes correntes	1,150	[24]
Espaço de ar não ventilado de 2 cm	0,125	[24]
Material isolante térmico (valor característico)	0,040	[36]
Lã de rocha (massa volúmica aparente entre 35 e 180 kg/m ³)	0,040	[24]
Vidro celular	0,050	[24]
Poliestireno expandido moldado	0,040	[24]
Poliestireno expandido extrudido	0,035	[24]
Espuma rígida de poliuretano	0,030	[24]
Placa de gesso cartonado	0,180	[47]
Betão de inertes correntes	1,750	[24]
Betão de inertes de argila expandida (1000-1200 kg/m ³)	0,460	[24]
Betão de inertes de argila expandida (600-800 kg/m ³)	0,250	[24]

ⁱ⁾ Coeficiente de condutibilidade térmica equivalente

PROPRIEDADES TÉRMICAS (cont.)**Calor específico, c**

Quantidade de calor necessária para fazer variar de 1 grau a temperatura da unidade de massa de um dado material. Expressa-se habitualmente em $[J/(kg \cdot ^\circ C)]$, [81].

Material	c [J/(kg·°C)]	Referência
Reboco à base de ligantes hidráulicos	840	[81]
Barro vermelho	920	[81]
Alvenaria de tijolo cerâmico vazado de 11 cm ⁱ⁾	585	[82]
Alvenaria de tijolo cerâmico vazado de 22 cm ⁱ⁾	510	[82]
Betão armado	1080	[81]
Placa de gesso cartonado	840	[82]
Material isolante térmico (valor característico)	1400	[36]

ⁱ⁾ Calor específico equivalente calculado de acordo com [82]

PROPRIEDADES HÍGRICAS

Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água, π

Quantidade de vapor de água que atravessa por difusão um provete de um dado material, por unidade de tempo e de espessura, quando sujeito a um gradiente de pressão de vapor unitário entre as suas faces. Expressa-se habitualmente em $[\text{g}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg})]$ ou em $[\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})]$, [21].

Permeância ao vapor de água, Pe

Densidade de fluxo de vapor de água que atravessa um dado elemento construtivo, referida à diferença de pressão parcial de vapor a que está sujeito entre as suas faces. Para um elemento constituído somente por um material homogêneo, o valor da sua permeância corresponde também à relação entre o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água do material e a sua espessura. Expressa-se habitualmente em $[\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{mmHg})]$ ou em $[\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{Pa})]$, [21].

Material	π [g/(m·h·mmHg)]	Pe [g/(m ² ·h·mmHg)]	Referência
Reboco à base de ligantes hidráulicos	400×10^{-5}	-	[21]
Alvenaria de tijolo vazado de 20 cm ⁱ⁾	-	2500×10^{-5}	[21]
Lâmina de ar não ventilada	9000×10^{-5}	-	[21]
Lã de rocha	7500×10^{-5}	-	[21]
Espuma rígida de poliuretano	200×10^{-5}	-	[21]
Poliestireno expandido moldado	300×10^{-5}	-	[21]
Poliestireno expandido extrudido	70×10^{-5}	-	[21]
Vidro celular	0	-	[21]
Placa de gesso cartonado	1200×10^{-5}	-	[21]
Folha de alumínio (25 μm)	-	140×10^{-5}	[21]

ⁱ⁾ Em [21] é apresentado o valor para alvenaria de tijolo vazado de 20 cm, não obstante a solução utilizada nas simulações ser em alvenaria de tijolo vazado de 22 cm.

PROPRIEDADES FÍSICAS

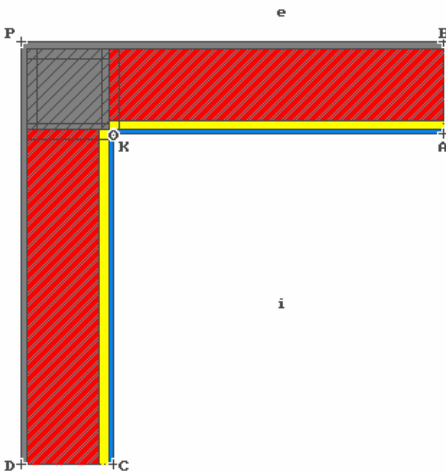
Massa volúmica aparente, ρ_a

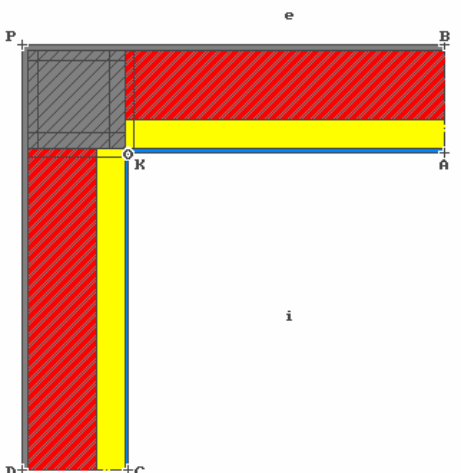
Relação entre o peso de um material seco e o seu volume aparente. Expressa-se habitualmente em $[\text{kg/m}^3]$, [81].

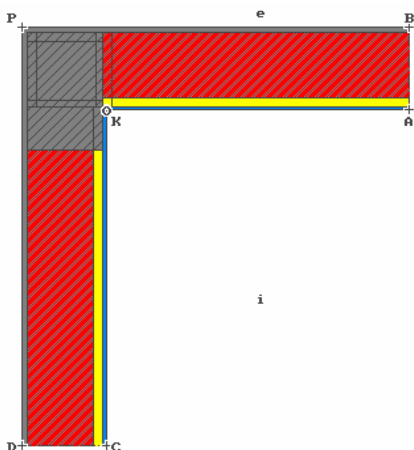
Material	ρ_a [kg/m^3]	Referência
Betão armado	2400	[36], [81]
Reboco à base de ligantes hidráulicos	1900	[81]
Placa de gesso cartonado	820	[63]
Alvenaria de tijolo cerâmico vazado de 11 cm	800	[23]
Alvenaria de tijolo cerâmico vazado de 22 cm	775	[23]
Barro vermelho	1925	[81]
Material isolante térmico (valor característico)	30	[36]

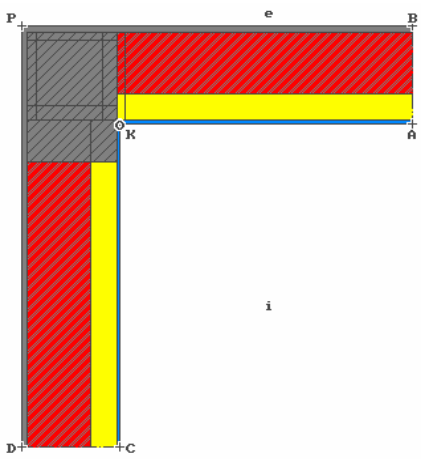
ANEXO II

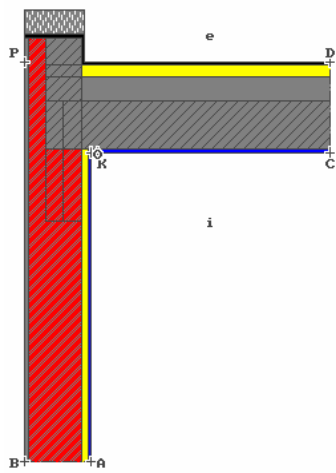
AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA FACE À GRAVIDADE ASSOCIADA À OCORRÊNCIA DE PONTES TÉRMICAS

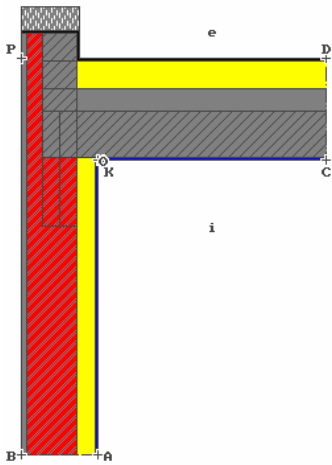
C1.1.3 – Duas paredes exteriores (pilar confinado)												
Parâmetro	Resultado	Modelo de simulação										
$f_{0,25}$ [-]	0,56											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,09 C1											
ψ_e [W/(m.°C)]	-0,27 C1											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,4											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Pilar confinado com secção quadrada de 25×25 cm ² . A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

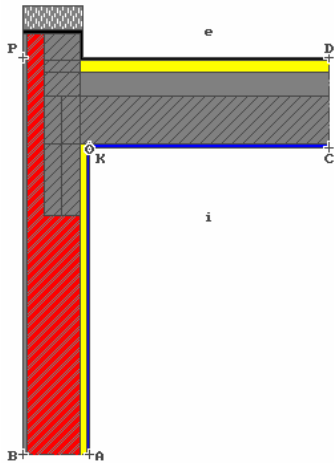
C1.1.8 – Duas paredes exteriores (pilar confinado)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,58											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,09 C1											
ψ_e [W/(m.°C)]	-0,14 C1											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	0,8											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Pilar confinado com secção quadrada de 30×30 cm ² . A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

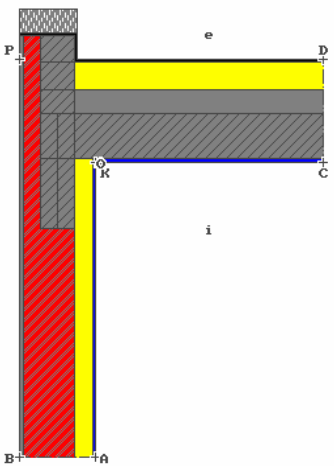
C1.2.3 – Duas paredes exteriores (pilar não confinado)												
Parâmetro	Resultado	Modelo de simulação										
$f_{0,25}$ [-]	0,42											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,31 C3											
ψ_e [W/(m.°C)]	-0,04 C1											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,7											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Prolongamento do pilar em 15 cm para além da espessura da parede (incluindo isolante térmico). A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

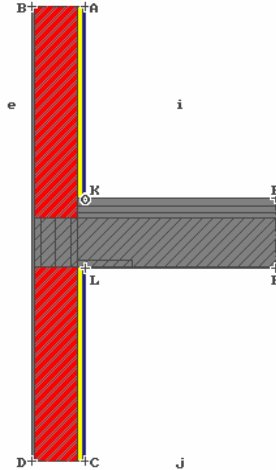
C1.2.8 – Duas paredes exteriores (pilar não confinado)											
Parâmetro	Resultado	Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,43										
ψ_i [W/(m.°C)]	0,36 C3										
ψ_e [W/(m.°C)]	0,12 C2										
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,1										
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais											
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5											
-4											
-3											
-2											
-1											
0											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.											
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%									
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%									
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%									
Observações	Prolongamento do pilar em 15 cm para além da espessura da parede (incluindo isolante térmico). A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.										

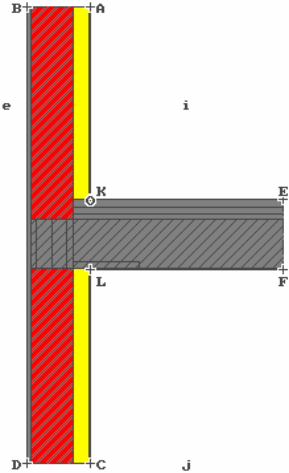
C2.1.3 – Laje de cobertura e parede exterior (sem viga)												
Parâmetro	Resultado	Modelo de simulação										
$f_{0,25}$ [-]	0,60											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,43 C3											
ψ_e [W/(m.°C)]	0,06 C1											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,7											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Considerou-se a existência de um material isolante térmico sobre a laje com 5 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção. Deverá ser evitada a correcção cerâmica em situações correntes.											

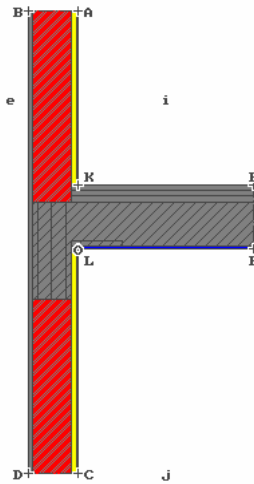
C2.1.8 – Laje de cobertura e parede exterior (sem viga)												
Parâmetro		Resultado		Modelo de simulação								
$f_{0,25}$ [-]		0,63										
ψ_i [W/(m.ºC)]		0,48 C3										
ψ_e [W/(m.ºC)]		0,24 C2										
$L_{i,e}$ [W/(m.ºC)]		1,2										
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (ºC)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Considerou-se a existência de um material isolante térmico sobre a laje com 12 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção. Deverá ser evitada a correcção cerâmica em situações correntes.											

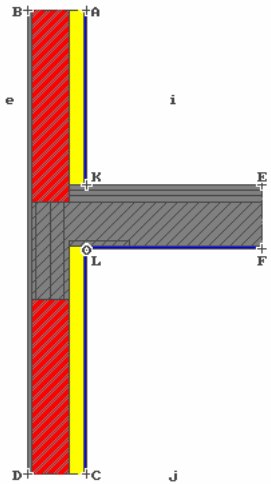
C2.2.3 – Laje de cobertura e parede exterior (com viga)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,58											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,47 C3											
ψ_e [W/(m.°C)]	0,10 C2											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,8											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Considerou-se a existência de um material isolante térmico sobre a laje com 5 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção. Deverá ser evitada a correcção cerâmica em situações correntes.											

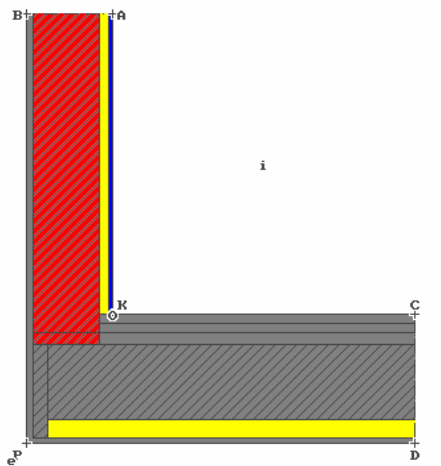
C2.2.8 – Laje de cobertura e parede exterior (com viga)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,62											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,50 C4											
ψ_e [W/(m.°C)]	0,26 C3											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,2											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Considerou-se a existência de um material isolante térmico sobre a laje com 12 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção. Deverá ser evitada a correcção cerâmica em situações correntes.											

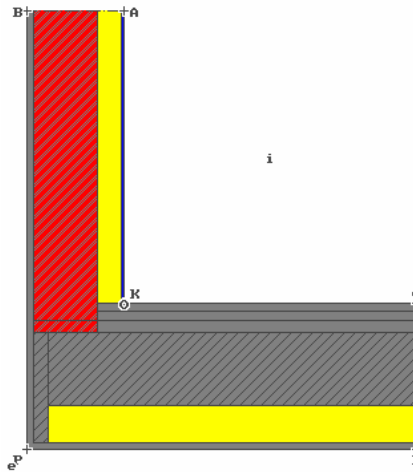
C3.1.3 – Laje intermédia e parede exterior (sem viga)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,65 0,66											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,79 C4											
ψ_e [W/(m.°C)]	0,56 C4											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	2,0											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} superiores a 70%										
Observações	O valor mínimo do parâmetro $f_{0,25}$, nas condições da simulação, ocorre sobre a laje estrutural. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

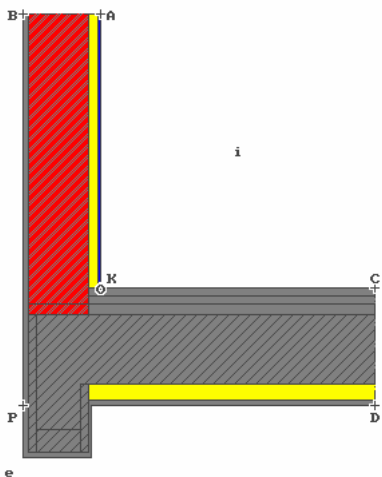
C3.1.8 – Laje intermédia e parede exterior (sem viga)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,68 0,69											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,75 C4											
ψ_e [W/(m.°C)]	0,63 C4											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,5											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	O valor mínimo do parâmetro f _{0,25} , nas condições da simulação, ocorre sobre a laje estrutural. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

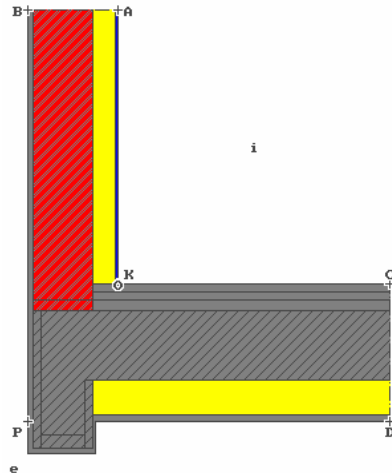
C3.2.3 – Laje intermédia e parede exterior (com viga)		
Parâmetro	Resultado	Modelo de simulação
$f_{0,25}$ [-]	0,64 0,63	
ψ_i [W/(m.°C)]	0,89 C4	
ψ_e [W/(m.°C)]	0,66 C4	
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	2,3	
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais		
text	tint (°C)	1213141516171819202122
-5		
-4		
-3		
-2		
-1		
0		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.		
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%
Observações	O valor mínimo do parâmetro f _{0,25} , nas condições da simulação, ocorre sob a laje estrutural. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.	

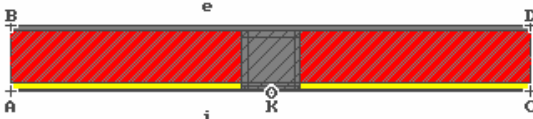
C3.2.8 – Laje intermédia e parede exterior (com viga)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,67 0,67											
ψ_i [W/(m·°C)]	0,82 C4											
ψ_e [W/(m·°C)]	0,69 C4											
$L_{i,e}$ [W/(m·°C)]	1,6											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

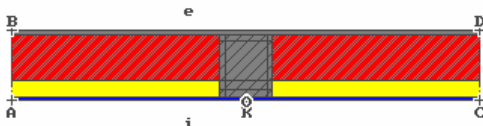
C4.1.3 – Laje sobre espaço exterior e parede exterior (sem viga)												
Parâmetro		Resultado		Modelo de simulação								
$f_{0,25}$ [-]		0,57										
ψ_i [W/(m.°C)]		0,41 C3										
ψ_e [W/(m.°C)]		0,01 C1										
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]		1,5										
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Considerou-se a existência de um material isolante térmico sob a laje com 6 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

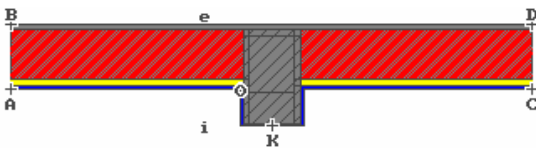
C4.1.8 – Laje sobre espaço exterior e parede exterior (sem viga)																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Parâmetro		Resultado		Modelo de simulação																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
$f_{0,25}$ [-]		0,61																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
ψ_i [W/(m.°C)]		0,48 C3																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
ψ_e [W/(m.°C)]		0,21 C2																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]		1,1																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
<table><tr><th>text</th><th>tint (°C)</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th></tr><tr><td>-5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>													text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	-5													-4													-3													-2													-1													0													1													2													3													4													5													6													7													8													9													10													11													12													13													14													15												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22																																																																																																																																																																																																																																																																																														
-5																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
-4																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
-3																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
-2																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
-1																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
2																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
3																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
4																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
5																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
6																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
7																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
8																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
9																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
10																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
11																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
12																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
13																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
14																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
15																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Observações	Considerou-se a existência de um material isolante térmico sob a laje com 13 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

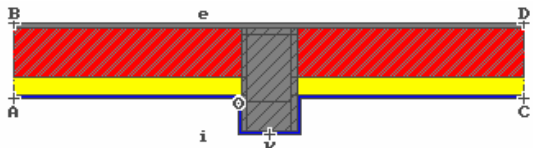
C4.2.3 – Laje sobre espaço exterior e parede exterior (com viga)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,56											
ψ_i [W/(m·°C)]	0,44 C3											
ψ_e [W/(m·°C)]	0,04 C1											
$L_{i,e}$ [W/(m·°C)]	1,5											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} superiores a 70%										
Observações	Considerou-se a existência de um material isolante térmico sob a laje com 6 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

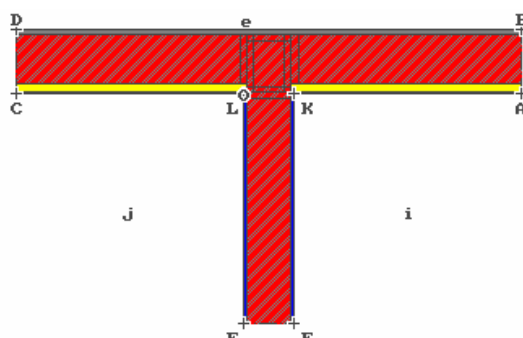
C4.2.8 – Laje sobre espaço exterior e parede exterior (com viga)												
Parâmetro		Resultado		Modelo de simulação								
$f_{0,25}$ [-]		0,59										
ψ_i [W/(m·°C)]		0,52 C4										
ψ_e [W/(m·°C)]		0,26 C3										
$L_{i,e}$ [W/(m·°C)]		1,1										
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Considerou-se a existência de um material isolante térmico sob a laje com 13 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

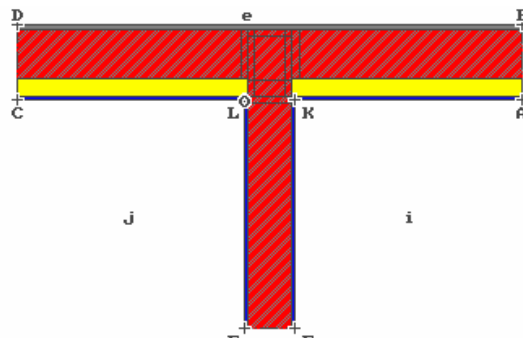
C5.1.3 – Pilar em zona corrente de parede exterior (confinado)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,53											
ψ_i [W/(m.ºC)]	0,36 C3											
ψ_e [W/(m.ºC)]	0,36 C3											
$L_{i,e}$ [W/(m.ºC)]	1,8											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
<i>Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.</i>												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} superiores a 70%										
Observações	Pilar confinado com 25 cm de largura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

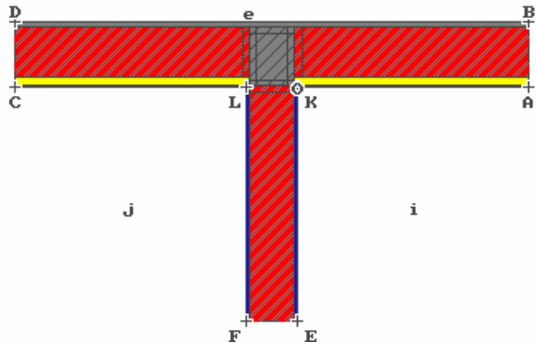
C5.1.8 – Pilar em zona corrente de parede exterior (confinado)											
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação								
$f_{0,25}$ [-]	0,54										
ψ_i [W/(m·°C)]	0,43 C3										
ψ_e [W/(m·°C)]	0,43 C3										
$L_{i,e}$ [W/(m·°C)]	1,2										
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais											
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5											
-4											
-3											
-2											
-1											
0											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.											
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} inferiores a 50%									
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} entre 50 e 70%									
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} superiores a 70%									
Observações	Pilar confinado com 25 cm de largura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.										

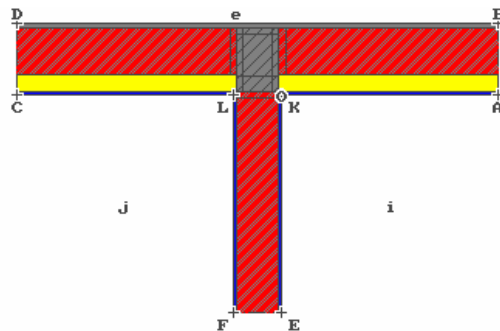
C5.2.3 – Pilar em zona corrente de parede exterior (não confinado)												
Parâmetro	Resultado	Modelo de simulação										
$f_{0,25}$ [-]	0,65 0,73											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,49 C3											
ψ_e [W/(m.°C)]	0,49 C3											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,9											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Prolongamento do pilar em 15 cm para além da espessura da parede (incluindo isolante térmico). O valor mínimo do parâmetro $f_{0,25}$, nas condições da simulação, ocorre na junção parede/pilar. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

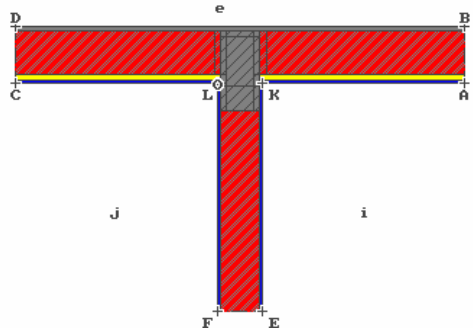
C5.2.8 – Pilar em zona corrente de parede exterior (não confinado)											
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação								
$f_{0,25}$ [-]	0,67 0,74										
ψ_i [W/(m.°C)]	0,55 C4										
ψ_e [W/(m.°C)]	0,55 C4										
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,4										
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais											
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5											
-4											
-3											
-2											
-1											
0											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.											
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%									
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%									
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%									
Observações	Prolongamento do pilar em 15 cm para além da espessura da parede (incluindo isolante térmico). O valor mínimo do parâmetro f _{0,25} , nas condições da simulação, ocorre na junção parede/pilar. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.										

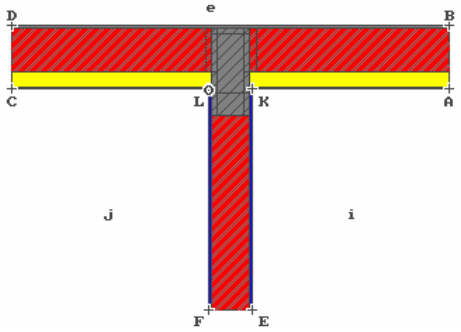
C6.1.3 – Parede interior e parede exterior (sem pilar)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,75											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,22 C2											
ψ_e [W/(m.°C)]	0,08 C1											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,5											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Parede interior em alvenaria de tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

C6.1.8 – Parede interior e parede exterior (sem pilar)																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Parâmetro		Resultado		Modelo de simulação																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
$f_{0,25}$ [-]		0,78																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
ψ_i [W/(m.ºC)]		0,29 C3																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
ψ_e [W/(m.ºC)]		0,21 C2																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
$L_{i,e}$ [W/(m.ºC)]		1,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
<table><tr><th>text</th><th>tint (ºC)</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th></tr><tr><td>-5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>													text	tint (ºC)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	-5													-4													-3													-2													-1													0													1													2													3													4													5													6													7													8													9													10													11													12													13													14													15												
text	tint (ºC)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22																																																																																																																																																																																																																																																																																														
-5																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
-4																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
-3																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
-2																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
-1																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
0																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
1																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
2																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
3																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
4																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
5																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
6																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
7																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
8																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
9																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
10																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
11																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
12																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
13																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
14																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
15																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
<i>Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.</i>																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
Observações	Parede interior em alvenaria de tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.																																																																																																																																																																																																																																																																																																									

C6.2.3 – Parede interior e parede exterior (pilar confinado)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,63											
ψ_i [W/(m.ºC)]	0,42 C3											
ψ_e [W/(m.ºC)]	0,28 C3											
$L_{i,e}$ [W/(m.ºC)]	1,7											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (ºC)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Parede interior em alvenaria de tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

C6.2.8 – Parede interior e parede exterior (pilar confinado)																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Parâmetro		Resultado		Modelo de simulação																																																																																																																																																																																																																																																																																
$f_{0,25}$ [-]		0,65																																																																																																																																																																																																																																																																																		
ψ_i [W/(m.°C)]		0,39 C3																																																																																																																																																																																																																																																																																		
ψ_e [W/(m.°C)]		0,31 C3																																																																																																																																																																																																																																																																																		
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]		1,1																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais																																																																																																																																																																																																																																																																																				
<table><tr><th>text tint (°C)</th><th>12</th><th>13</th><th>14</th><th>15</th><th>16</th><th>17</th><th>18</th><th>19</th><th>20</th><th>21</th><th>22</th></tr><tr><td>-5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>-1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>0</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>													text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	-5												-4												-3												-2												-1												0												1												2												3												4												5												6												7												8												9												10												11												12												13												14												15											
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22																																																																																																																																																																																																																																																																									
-5																																																																																																																																																																																																																																																																																				
-4																																																																																																																																																																																																																																																																																				
-3																																																																																																																																																																																																																																																																																				
-2																																																																																																																																																																																																																																																																																				
-1																																																																																																																																																																																																																																																																																				
0																																																																																																																																																																																																																																																																																				
1																																																																																																																																																																																																																																																																																				
2																																																																																																																																																																																																																																																																																				
3																																																																																																																																																																																																																																																																																				
4																																																																																																																																																																																																																																																																																				
5																																																																																																																																																																																																																																																																																				
6																																																																																																																																																																																																																																																																																				
7																																																																																																																																																																																																																																																																																				
8																																																																																																																																																																																																																																																																																				
9																																																																																																																																																																																																																																																																																				
10																																																																																																																																																																																																																																																																																				
11																																																																																																																																																																																																																																																																																				
12																																																																																																																																																																																																																																																																																				
13																																																																																																																																																																																																																																																																																				
14																																																																																																																																																																																																																																																																																				
15																																																																																																																																																																																																																																																																																				
<i>Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.</i>																																																																																																																																																																																																																																																																																				
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} inferiores a 50%																																																																																																																																																																																																																																																																																		
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} entre 50 e 70%																																																																																																																																																																																																																																																																																		
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR_{int} superiores a 70%																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Observações	Parede interior em alvenaria de tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura. A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.																																																																																																																																																																																																																																																																																			

C6.3.3 – Parede interior e parede exterior (pilar não confinado)												
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação									
$f_{0,25}$ [-]	0,66											
ψ_i [W/(m.°C)]	0,52 C4											
ψ_e [W/(m.°C)]	0,38 C3											
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,8											
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais												
text	tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5												
-4												
-3												
-2												
-1												
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.												
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%										
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%										
Observações	Parede interior em alvenaria de tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura. Prolongamento do pilar em 15 cm para além da espessura da parede (incluindo isolante térmico). A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.											

C6.3.8 – Parede interior e parede exterior (pilar não confinado)											
Parâmetro	Resultado		Modelo de simulação								
$f_{0,25}$ [-]	0,68										
ψ_i [W/(m.°C)]	0,59 C4										
ψ_e [W/(m.°C)]	0,51 C4										
$L_{i,e}$ [W/(m.°C)]	1,3										
Influência das condições climáticas exteriores e interiores na ocorrência de condensações superficiais											
text tint (°C)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
-5											
-4											
-3											
-2											
-1											
0											
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
Nota: Para uma situação concreta deverá ser sempre ponderada a probabilidade de ocorrência de um dado par de valores de humidade relativa interior e de temperatura interior.											
Legenda		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} inferiores a 50%									
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} entre 50 e 70%									
		Ocorrem condensações superficiais para valores de HR _{int} superiores a 70%									
Observações	Parede interior em alvenaria de tijolo cerâmico furado com 20 cm de espessura. Prolongamento do pilar em 15 cm para além da espessura da parede (incluindo isolante térmico). A configuração construtiva apresentada deverá ser objecto de correcção.										

ANEXO III

ANÁLISE DO DESEMPENHO FACE ÀS EXIGÊNCIAS DE CONFORTO TÉRMICO EM EDIFÍCIOS RESIDENCIAIS

EXEMPLO DE CÁLCULO DE PARÂMETROS TÉRMICOS EM REGIME DINÂMICO

No presente anexo apresenta-se um exemplo de cálculo dos parâmetros representativos do comportamento térmico em regime dinâmico necessários para a integração no programa de simulação utilizado no Capítulo 5, de acordo com a versão provisória da ISO 13786 [36]:

- Admitância térmica, Y (ou de acordo com a nomenclatura normativa Y_{11});
- Amortecimento térmico, f (nomenclatura similar à normativa);
- Atraso térmico, φ (ou de acordo com a nomenclatura normativa Δt_Y).

O exemplo escolhido corresponde à parede exterior com um sistema de isolamento térmico pelo interior, cujas propriedades térmicas, físicas e geométricas se compilam no Quadro III.1, sendo as três primeiras obtidas em referências bibliográficas (Anexo I) e as restantes calculadas (com a exceção da caracterização geométrica – espessura (d)).

Quadro III.1 – Caracterização da solução de parede exterior com isolamento térmico pelo interior para a aplicação da metodologia de cálculo proposta pela ISO 13786 [36]

Material	λ [W/(m·°C)]	ρ_a [kg/m ³]	c [J/(kg·°C)]	d [m]	R [m ² ·°C/W]	a [mm ² /s]	δ [m]	ξ [-]
Superfície Interior	-	-	-	-	0,130	-	-	-
Gesso Cartonado	0,180	820	840	0,0125	0,069	0,261	0,085	0,147
Alvenaria Tijolo 22cm	0,478	775	510	0,22	0,460	1,209	0,182	1,206
Isolamento Térmico	0,040	30	1400	0,05	1,250	0,952	0,162	0,309
Reboco Exterior	1,150	1900	840	0,02	0,017	0,721	0,141	0,142
Superfície Exterior	-	-	-	-	0,040	—	—	—

Sendo:

λ – coeficiente de condutibilidade térmica, [W/(m·°C)];

ρ_a – massa volúmica aparente, [kg/m³];

c – calor específico, [J/(kg·°C)];

d – espessura, [m];

R – resistência térmica, [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$];

a – difusividade térmica, [mm^2/s];

δ – ”periodic penetration depth of a heat wave in a material”, [m];

ξ – ”ratio of the thickness of the layer to the penetration depth”, [-].

Seguidamente são calculados, como exemplo, os valores destacados no Quadro III.1 para o componente gesso cartonado, sendo o procedimento em tudo similar para os restantes componentes do elemento construtivo.

Saliente-se que, de acordo com as condições da metodologia de simulação adoptada, o período de variação considerado foi de 24 h (86400 s).

$$R = \frac{d}{\lambda} = \frac{0,0125}{0,18} = 0,069 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho_a \cdot c} = \frac{0,18}{820 \cdot 840} \cdot 1000000 = 0,261 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\lambda \cdot T}{\pi \cdot \rho_a \cdot c}} = \sqrt{\frac{0,18 \cdot 86400}{\pi \cdot 820 \cdot 840}} = 0,085 \text{ m}$$

$$\xi = \frac{d}{\delta} = \frac{0,0125}{0,085} = 0,147$$

Após a determinação de todas as propriedades necessárias à aplicação do método, isto é, após construído o Quadro III.1, foi desenvolvida uma folha de cálculo que as integra e prossegue com a determinação dos parâmetros dinâmicos propriamente ditos.

Para tal, a norma [36] preconiza a construção de uma matriz de transferência para cada um dos componentes do elemento construtivo, que posteriormente são multiplicadas com uma ordenação predeterminada (a partir do exterior), de modo a obter a matriz global

característica do elemento construtivo em estudo, designada por Z_{ee} (onde o índice “ee” significa “entre ambientes térmicos” – “environment”).

Assim para o presente caso a matriz Z_{ee} é obtida da seguinte forma:

$$Z_{ee} = Z_{Re\,xt} \cdot Z_{Re\,boco} \cdot Z_{Tijolo22} \cdot Z_{Isolamento} \cdot Z_{Gesso} \cdot Z_{R\,int}$$

As matrizes referentes às resistências térmicas superficiais são:

$$Z_{Re\,xt} = \begin{pmatrix} 1 & -R_{ext} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -0,040 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Z_{R\,int} = \begin{pmatrix} 1 & -R_{int} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -0,130 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

As restantes matrizes foram determinadas a partir da matriz genérica Z_{mn} (onde os índices “m” e “n” pretendem designar zonas térmicas distintas):

$$Z_{mn} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}$$

Cada elemento da matriz, Z_{mn} , é calculado por:

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi) \cdot \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \cdot \sin(\xi)$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2 \cdot \lambda} \cdot \{ \sinh(\xi) \cdot \cos(\xi) + \cosh(\xi) \cdot \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \cdot \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cdot \cos(\xi)] \}$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta} \cdot \{ \sinh(\xi) \cdot \cos(\xi) - \cosh(\xi) \cdot \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \cdot \cos(\xi) + \cosh(\xi) \cdot \sin(\xi)] \}$$

Segue-se um quadro-resumo de todos os elementos calculados para as diferentes matrizes (Quadro III.2) completando-se posteriormente com um exemplo de cálculo para uma delas.

Quadro III.2 – Compilação dos elementos constituintes das matrizes referentes aos diversos componentes do elemento construtivo

Elementos da Matriz	Reboco Exterior	Alvenaria Tijolo 22 cm	Isolamento Térmico	Gesso Cartonado
Z_{11}	$0,999 + 2,019 \times 10^{-2} j$	$0,649 + 1,421 j$	$0,998 + 9,544 \times 10^{-2} j$	$0,999 + 2,174 \times 10^{-2} j$
Z_{21}	$1,562 \times 10^{-2} - 2,321 j$	$3,036 - 5,878 j$	$4,859 - 0,153 j$	$4,538 \times 10^{-3} - 0,626 j$
Z_{12}	$-1,739 \times 10^{-2} - 1,170 \times 10^{-4} j$	$-0,428 - 0,221 j$	$-1,250 - 3,977 \times 10^{-2} j$	$-6,944 \times 10^{-2} - 5,032 \times 10^{-4} j$
Z_{22}	$0,999 + 2,019 \times 10^{-2} j$	$0,649 + 1,421 j$	$0,998 + 9,544 \times 10^{-2} j$	$0,999 + 2,174 \times 10^{-2} j$

Novamente se exemplifica o cálculo dos valores destacados (Quadro III.2):

$$\begin{aligned}
 Z_{11} = Z_{22} &= \cosh(\xi) \cdot \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \cdot \sin(\xi) \\
 &= \cosh(0,142) \cdot \cos(0,142) + j \sinh(0,142) \cdot \sin(0,142) \\
 &= 0,999 + 2,019 \times 10^{-2} j
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{21} &= -\frac{\lambda}{\delta} \cdot \{ \sinh(\xi) \cdot \cos(\xi) - \cosh(\xi) \cdot \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \cdot \cos(\xi) + \cosh(\xi) \cdot \sin(\xi)] \} \\
 &= -\frac{1,15}{0,141} \cdot \left\{ \sinh(0,142) \cdot \cos(0,142) - \cosh(0,142) \cdot \sin(0,142) \right. \\
 &\quad \left. + j [\sinh(0,142) \cdot \cos(0,142) + \cosh(0,142) \cdot \sin(0,142)] \right\} \\
 &= 1,562 \times 10^{-2} - 2,321 j
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{12} &= -\frac{\delta}{2 \cdot \lambda} \cdot \{ \sinh(\xi) \cdot \cos(\xi) + \cosh(\xi) \cdot \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \cdot \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cdot \cos(\xi)] \} \\
 &= -\frac{0,141}{2 \cdot 1,15} \cdot \left\{ \sinh(0,142) \cdot \cos(0,142) + \cosh(0,142) \cdot \sin(0,142) \right. \\
 &\quad \left. + j [\cosh(0,142) \cdot \sin(0,142) - \sinh(0,142) \cdot \cos(0,142)] \right\} \\
 &= -1,739 \times 10^{-2} - 1,170 \times 10^{-4} j
 \end{aligned}$$

Finalmente é possível proceder ao cálculo da matriz final Z_{ee} .

$$\begin{aligned}
 Z_{ee} &= Z_{Re\ xi} \cdot Z_{Re\ boco} \cdot Z_{Tijolo\ 22} \cdot Z_{Isolamento} \cdot Z_{Gesso} \cdot Z_{R\ int} \\
 Z_{ee} &= \begin{pmatrix} 1 & -0,04 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} 0,999 + 2,019 \times 10^{-2} j & -1,739 \times 10^{-2} - 1,170 \times 10^{-4} j \\ 1,562 \times 10^{-2} - 2,321 j & 0,999 + 2,019 \times 10^{-2} j \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} 0,649 + 1,421 j & -0,428 - 0,221 j \\ 3,036 - 5,878 j & 0,649 + 1,421 j \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} 0,998 + 9,544 \times 10^{-2} j & -1,250 - 3,977 \times 10^{-2} j \\ 4,859 - 0,153 j & 0,998 + 9,544 \times 10^{-2} j \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} 0,999 + 2,174 \times 10^{-2} j & -6,944 \times 10^{-2} - 5,032 \times 10^{-4} j \\ 4,538 \times 10^{-3} - 0,626 j & 0,999 + 2,174 \times 10^{-2} j \end{pmatrix} \\
 &\times \begin{pmatrix} 1 & -0,16 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 Z_{ee} &= \begin{pmatrix} -1,651 + 2,358 j & -0,448 - 3,144 j \\ 14,699 - 1,140 j & -11,180 + 11,718 j \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Conhecida a matriz final Z_{ee} é então possível conhecer os referidos parâmetros dinâmicos, cujo cálculo se detalha nas páginas seguintes.

• Admitância térmica, Y

$$\begin{aligned} Y &= -\frac{Z_{11}}{Z_{12}} \\ &= -\frac{-1,651 + 2,358j}{-0,448 - 3,144j} \\ &= 0,662 + 0,619j \\ |Y| &= 0,906 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \end{aligned}$$

▪ Amortecimento Térmico, f

$$f = \frac{|Y_{12}|}{U}$$
$$= \frac{0,315}{0,508}$$

$$\mathbf{f = 0,619}$$

Sendo Y_{12} definido como coeficiente de transmissão térmica periódico (“periodic thermal transmittance”), calculado da seguinte forma.

$$Y_{12} = -\frac{1}{Z_{12}}$$
$$= -\frac{1}{-0,448 - 3,144j}$$
$$= 4,439 \times 10^{-2} - 0,312j$$
$$|Y_{12}| = 0,315 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

O valor de U (coeficiente de transmissão térmica) é como sabido determinado a partir do inverso do somatório das resistências térmicas:

$$U = \frac{1}{R_{\text{int}} + R_{\text{Gesso}} + R_{\text{Tijolo22}} + R_{\text{Isolamento}} + R_{\text{Re boco}} + R_{\text{ext}}}$$
$$= \frac{1}{0,130 + 0,069 + 0,460 + 1,250 + 0,017 + 0,04}$$
$$= 0,508 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

▪ **Atraso Térmico, φ**

$$\varphi = \Delta T_Y = \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{12})$$

Para determinar o argumento de Y_{12} foram utilizados os critérios que se encontram no anexo C da norma [36], ficando para o presente exemplo:

$$\begin{aligned} \arg(Y_{12}) &= \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \\ \arg(Y_{12}) &= \arctan\left(\frac{-0,3117}{4,439 \times 10^{-2}}\right) = -1,429 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{12}) \\ &= \frac{24}{2\pi} \times (-1,429) \end{aligned}$$

$$\varphi = -5,46 \text{ h}$$